Research, Society and Development, v. 15, n. 6, e7515651274, 2026
(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v15i6.51274

Fracionamento de compostos fenólicos em erva-mate (*Ilex paraguariensis*) orgânica e convencional: Comparação entre compostos fenólicos livres e conjugados

Phenolic fractionation of organic and conventional yerba mate (*Ilex paraguariensis*): Comparison of free and conjugated phenolic compounds

Fraccionamiento de compuestos fenólicos en yerba mate (*Ilex paraguariensis*) orgánica y convencional: Comparación entre compuestos fenólicos libres y conjugados

Recebido: 09/06/2026 | Aceito: 19/06/2026 | Publicado: 20/06/2026

Juliana Martins Dias
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6771-4241
Universidade Federal do Rio Grande, Brasil
E-mail: martinsdiasjuliana@gmail.com
Gabriel Moraes Marin
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-8939-4399
Universidade Federal do Rio Grande, Brasil
E-mail: gabrielm.marin022@gmail.com
Michele Moraes de Souza
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3558-3643
Universidade Federal do Rio Grande, Brasil
E-mail: michele.moraesdesouza@gmail.com
Rodolfo Carapelli
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8215-5177
Universidade Federal do Rio Grande, Brasil
E-mail: rcarapelli@furg.br

Resumo

A erva-mate (*Ilex paraguariensis)* constitui uma importante fonte dietética de compostos fenólicos e está entre as bebidas mais consumidas na América do Sul. Este estudo teve como objetivo aplicar um método de fracionamento de compostos fenólicos, baseado em procedimentos descritos na literatura científica, para avaliar a distribuição de compostos fenólicos livres (CFL) e compostos fenólicos conjugados (CFC) em amostras comerciais produzidas sob sistemas de cultivo orgânico e convencional. Os teores de compostos fenólicos foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu e expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de massa seca (mg EAG g^{-1} MS). O procedimento de fracionamento revelou que os CFC representaram uma parcela substancial do conteúdo fenólico solúvel, evidenciando a importância de considerar as formas conjugadas na avaliação do perfil fenólico da erva-mate. As frações provenientes das folhas apresentaram concentrações significativamente superiores de compostos fenólicos em comparação às frações provenientes dos talos ($p < 0,05$), independentemente do sistema de cultivo. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as amostras orgânicas e convencionais para CFL, CFC ou compostos fenólicos totais (CFT). Os resultados demonstram a utilidade do fracionamento baseado em hidrólise ácida para uma caracterização mais abrangente dos compostos fenólicos presentes na erva-mate comercial e indicam que o sistema de cultivo, isoladamente, pode não constituir um fator determinante do conteúdo fenólico desses produtos.

Palavras-chave: Hidrólise Ácida; Fracionamento Fenólico; Alimentos Orgânicos**.**

Abstract

Yerba mate (*Ilex paraguariensis*) is an important dietary source of phenolic compounds and is among the most widely consumed beverages in South America. This study aimed to apply a phenolic compound fractionation method, based on procedures described in the scientific literature, to evaluate the distribution of free phenolic compounds (FPC) and conjugated phenolic compounds (CPC) in commercial samples produced under organic and conventional cultivation systems. Phenolic compound contents were determined using the Folin–Ciocalteu method and expressed as milligrams of gallic acid equivalents per gram of dry weight (mg GAE g^{-1} DW). The fractionation procedure revealed that CPC accounted for a substantial proportion of the soluble phenolic content, highlighting the importance of considering conjugated forms when evaluating the phenolic profile of yerba mate. Fractions obtained from leaves showed significantly higher phenolic compound concentrations than those obtained from stems ($p < 0.05$), regardless of the cultivation system. No statistically significant differences were observed between organic and conventional samples for FPC, CPC, or total phenolic compounds (TPC). These results demonstrate the usefulness of acid

hydrolysis-based fractionation for a more comprehensive characterization of phenolic compounds present in commercial yerba mate and indicate that the cultivation system alone may not be a determining factor influencing the phenolic content of these products.
Keywords: Acid Hydrolysis; Phenolic Fractionation; Organic Foods.

Resumen
La yerba mate (*Ilex paraguariensis*) constituye una importante fuente dietética de compuestos fenólicos y se encuentra entre las bebidas más consumidas en América del Sur. Este estudio tuvo como objetivo aplicar un método de fraccionamiento de compuestos fenólicos, basado en procedimientos descritos en la literatura científica, para evaluar la distribución de compuestos fenólicos libres (CFL) y compuestos fenólicos conjugados (CFC) en muestras comerciales producidas bajo sistemas de cultivo orgánico y convencional. Los contenidos de compuestos fenólicos fueron determinados mediante el método de Folin-Ciocalteu y expresados en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de materia seca (mg EAG g^{-1} MS). El procedimiento de fraccionamiento reveló que los CFC representaron una proporción sustancial del contenido fenólico soluble, destacando la importancia de considerar las formas conjugadas al evaluar el perfil fenólico de la yerba mate. Las fracciones obtenidas de las hojas presentaron concentraciones significativamente mayores de compuestos fenólicos que las obtenidas de los tallos ($p < 0,05$), independientemente del sistema de cultivo. No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las muestras orgánicas y convencionales para CFL, CFC o compuestos fenólicos totales (CFT). Estos resultados demuestran la utilidad del fraccionamiento basado en hidrólisis ácida para una caracterización más amplia de los compuestos fenólicos presentes en la yerba mate comercial e indican que el sistema de cultivo, por sí solo, puede no ser un factor determinante del contenido fenólico de estos productos.
Palabras clave: Hidrólisis Ácida; Fraccionamiento Fenólico; Alimentos Orgánicos.

1. Introdução

Ilex paraguariensis é amplamente conhecida por sua utilização na produção de erva-mate (EM), matéria-prima empregada tradicionalmente no preparo das bebidas chimarrão e tererê. Além de seu consumo na forma de infusão, a erva-mate tem despertado crescente interesse devido ao seu potencial funcional, uma vez que seus extratos apresentam compostos bioativos associados a efeitos benéficos à saúde. Adicionalmente, a planta tem sido utilizada no desenvolvimento de diferentes produtos alimentícios e bebidas, como pães e bebidas energéticas, ampliando suas possibilidades de aplicação tecnológica (Branco et al., 2013; Santetti et al., 2021). Outro aspecto relevante dos produtos à base de erva-mate é a utilização conjunta de diferentes estruturas vegetais, principalmente folhas e talos. Considerando que distintos tecidos e órgãos vegetais apresentam perfis metabólicos específicos, a proporção desses componentes pode influenciar a composição química e, consequentemente, as características nutricionais dos produtos comercializados.

A dieta constitui a principal fonte de compostos fenólicos (CF) para os seres humanos, uma vez que essas substâncias são sintetizadas pelos vegetais. Estima-se que a ingestão diária de polifenóis possa atingir aproximadamente 1 g por dia (Cruz-Carrión et al., 2023). Esses compostos apresentam elevado interesse nutricional devido às suas propriedades antioxidantes e à sua associação com a redução do risco de doenças inflamatórias, neurodegenerativas, cardiovasculares e metabólicas, além de potenciais efeitos antiobesidade e anticâncer (Gil-Martín et al., 2022). Nesse contexto, a erva-mate destaca-se como uma importante fonte dietética de compostos fenólicos, especialmente ácidos clorogênicos (Meinhart et al., 2010; Song et al., 2025), o que reforça seu interesse tanto do ponto de vista nutricional quanto para aplicações tecnológicas envolvendo a obtenção e utilização desses metabólitos bioativos.

Os compostos fenólicos são metabólitos secundários cuja biossíntese é fortemente influenciada pelas condições ambientais e pelos diferentes tipos de estresse aos quais as plantas estão submetidas. Dessa forma, práticas de cultivo podem afetar significativamente a quantidade e a distribuição desses compostos nos tecidos vegetais. Além de contribuírem para características organolépticas como cor, aroma, sabor e textura, os compostos fenólicos desempenham papel fundamental nos mecanismos de defesa vegetal frente a estresses físicos, químicos e biológicos (Zhang et al., 2020; Araujo et al., 2021; Cruz-Carrión et al., 2023).

No contexto da produção agrícola, o cultivo orgânico é frequentemente associado à redução do uso de insumos

externos e à adoção de práticas de manejo mais restritivas, fatores que podem influenciar as respostas das plantas ao estresse e a produção de metabólitos secundários. Esse cenário tem contribuído para a percepção de que alimentos produzidos em sistemas orgânicos apresentam maiores concentrações de compostos fenólicos e outros constituintes bioativos, hipótese apoiada por alguns estudos (Vallverdú-Queralt & Lamuela-Raventós, 2016; Hurtado-Barroso et al., 2019; Colling et al., 2025), mas que não encontra consenso na literatura (Faller & Fialho, 2010). Uma ampla metanálise conduzida por Barański et al. (2014) indicou que produtos vegetais orgânicos tendem a apresentar, em média, teores de compostos fenólicos entre 30 e 40% superiores aos observados em sistemas convencionais. Entretanto, os autores também destacaram a elevada variabilidade entre espécies, condições de cultivo e sistemas de produção. A percepção de uma possível superioridade nutricional dos alimentos orgânicos contribui, em parte, para o maior valor agregado frequentemente atribuído a esses produtos no mercado (Rahman et al., 2021; Tixier et al., 2022; Aweke, 2025).

A maioria dos estudos sobre compostos fenólicos concentra-se na extração e quantificação da fração livre desses compostos por meio do uso de solventes orgânicos. Entretanto, uma parcela significativa dos compostos fenólicos presentes em matrizes vegetais encontra-se associada a outras moléculas, formando os chamados compostos fenólicos conjugados (CFC). Essa fração tem despertado crescente interesse devido à sua relevância para as áreas de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos (Gil-Martín et al., 2022; Strieder et al., 2025). Do ponto de vista nutricional, a conjugação dos polifenóis com diferentes biomoléculas pode influenciar significativamente sua biodisponibilidade e metabolismo. Em alguns casos, essas associações permitem que os compostos alcancem o cólon praticamente intactos, onde podem ser metabolizados pela microbiota intestinal e exercer efeitos biológicos locais. Em outros, como na associação com determinados lipídios, a conjugação pode reduzir sua disponibilidade e favorecer sua eliminação (Bento-Silva et al., 2020; Jakobek, 2015).

Métodos de fracionamento de compostos fenólicos baseados em processos hidrolíticos constituem uma estratégia eficiente para a obtenção da fração de compostos fenólicos conjugados (CFC), uma vez que promovem a ruptura das interações entre esses compostos e outras biomoléculas presentes nos tecidos vegetais. Dessa forma, torna-se possível distinguir e quantificar as frações de compostos fenólicos livres (CFL) e conjugados (Pérez-Jimenez et al., 2013; Wang et al., 2020). Entre essas abordagens, a hidrólise ácida tem sido amplamente empregada em estudos voltados à extração e caracterização de compostos fenólicos, destacando-se como uma ferramenta importante para a avaliação mais abrangente dessas substâncias em diferentes matrizes vegetais (Krygier et al., 1982; Ding et al., 2020).

A aplicação de estratégias de fracionamento baseadas em hidrólise tem sido reportada em diferentes matrizes vegetais. Mihaylova et al. (2023), por exemplo, utilizaram essa abordagem para a obtenção de compostos fenólicos livres (CFL) e ligados em resíduos de casca de pêssego, demonstrando a eficiência do processo de fracionamento e evidenciando o potencial de valorização desse resíduo agroindustrial. De forma semelhante, Debski et al. (2021) empregaram uma metodologia de extração associada à hidrólise ácida para investigar a influência de elicitores sobre diferentes frações fenólicas (livres, esterificadas e glicosiladas) em amostras de brócolis e rabanete. Adicionalmente, Li et al. (2020), ao compararem diferentes estratégias de fracionamento de compostos fenólicos, avaliaram o desempenho da hidrólise ácida e observaram que essa abordagem apresenta maior eficiência na ruptura de ligações glicosídicas quando comparada às ligações éter e éster, favorecendo a liberação de compostos fenólicos anteriormente associados a outras biomoléculas.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo aplicar um método de fracionamento de compostos fenólicos, baseado em procedimentos descritos na literatura científica, para avaliar a distribuição de compostos fenólicos livres (CFL) e compostos fenólicos conjugados (CFC) em amostras comerciais de erva-mate *Ilex paraguariensis* produzidas sob sistemas de cultivo orgânico e convencional. Adicionalmente, considerando que os produtos comerciais avaliados são constituídos por diferentes proporções de folhas e talos, investigou-se a influência dessas estruturas vegetais na distribuição das frações fenólicas estudadas.

2. Metodologia

2.1 Instrumentação

Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se uma pesquisa laboratorial de abordagem quantitativa (Risemberg et al., 2026; Pereira et al., 2018), com utilização de estatística descritiva, sendo os resultados expressos por valores de média e desvio-padrão (Shitsuka et al., 2014). Para esse fim, foram utilizados um agitador orbital (Nova Ética, modelo 109), uma centrífuga (Quimis, modelo Q335D), um espectrofotômetro UV-Vis de feixe duplo (Shimadzu, modelo UV-2550), um banho ultrassônico (Ultronique, modelo Eco-Sonics) e um evaporador rotativo (Heidolph, modelo Laborota 4000).

2.2 Reagentes

Foram utilizados os seguintes reagentes: água purificada obtida em sistema Millipore Direct-Q UV3; ácido clorídrico P.A. (Alphatec, EUA; Química Moderna, Brasil); metanol P.A. e grau UV/HPLC (Química Moderna e Dinâmica, Brasil); etanol absoluto (Neon, Brasil); acetato de etila P.A. (Synth, Brasil); carbonato de sódio P.A. (Synth, Brasil); éter etílico P.A. (Synth, Brasil); hexano P.A. (Êxodo Científica, Brasil); hidróxido de bário P.A. (Dinâmica, Brasil); reagente de Folin-Ciocalteu (Merck, Alemanha); sulfato de zinco P.A. (Química Moderna, Brasil); e sulfato de cobre P.A. (Synth, Brasil).

2.3 Preparo de amostra

2.3.1 Amostras

As amostras de erva-mate contendo folhas e talos foram adquiridas em estabelecimentos comerciais do município de Rio Grande (RS, Brasil), bem como por meio de plataformas de comércio eletrônico. Foram analisadas dez amostras comercializadas como convencionais e oito comercializadas como orgânicas. Todas as amostras orgânicas apresentavam o selo oficial de certificação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em conformidade com a Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003 (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003). Todas as amostras eram provenientes da região Sul do Brasil e encontravam-se dentro do prazo de validade informado pelos fabricantes. Para a realização das análises, folhas e talos foram separados manualmente e avaliados individualmente.

As amostras foram submetidas à peneiração utilizando um conjunto de duas peneiras. As partículas com diâmetro inferior a 0,420 mm atravessaram a malha mais fina e foram coletadas como fração foliar. O material retido na peneira superior, constituído por folhas e talos com partículas superiores a 2,0 mm, foi separado manualmente. Os talos foram então isolados das folhas e ambos os materiais foram triturados individualmente até atingirem granulometria compatível com a passagem pela peneira de 0,420 mm. Posteriormente, as folhas trituradas foram reunidas à fração foliar previamente coletada, enquanto os talos foram armazenados separadamente. As frações de folhas e talos foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C até massa constante. Após a secagem, os materiais foram acondicionados separadamente em frascos de polietileno devidamente identificados para posterior realização das análises.

2.3.2 Fracionamento de compostos fenólicos

A metodologia de fracionamento empregada neste estudo foi baseada nas estratégias descritas por Krygier et al. (1982), Kim et al. (2006) e Li et al. (2020). O procedimento consistiu em etapas sucessivas de extração com solventes orgânicos e hidrólise ácida, visando a obtenção e quantificação das frações de compostos fenólicos livres e conjugados. As etapas do método são descritas a seguir.

2.3.2.1 Fração de compostos fenólicos livres

Para a extração dos compostos fenólicos livres (CFL), 500 mg de amostra foram adicionados a 10 mL de etanol 80% (v/v) e mantidos sob agitação em agitador orbital (120 rpm) à temperatura ambiente (20 ± 1 °C) por 1 h. Em seguida, a mistura foi centrifugada a 2000 rpm por 1 min e o sobrenadante coletado. Esse procedimento foi repetido três vezes, sendo os extratos reunidos e submetidos a um processo de clarificação.

A clarificação foi realizada pela adição de 2 mL de solução de hidróxido de bário (0,1 mmol L^{-1}) e 2 mL de solução de sulfato de zinco a 5% (m/v) a 10 mL do extrato, conforme descrito por Souza et al. (2009). Após repouso por 15 min, realizou-se nova centrifugação a 2000 rpm por 1 min, sendo o sobrenadante recolhido.

Os extratos clarificados foram concentrados em evaporador rotativo a 100 °C até aproximadamente 1% do volume inicial. Posteriormente, os resíduos foram ressuspendidos em 10 mL de água ultrapura e submetidos a um procedimento de partição líquido-líquido mediante adição de 10 mL de uma mistura de éter etílico e acetato de etila (1:1, v/v). A mistura foi homogeneizada por agitação em vortex durante 5 s e mantida em repouso até a separação das fases. A fase orgânica, contendo os compostos fenólicos livres, foi coletada, evaporada em banho-maria a 50 °C por 16 h e, posteriormente, ressuspendida em 10 mL de metanol grau HPLC.

2.3.2.2 Fração de compostos fenólicos conjugados

Na fase de obtenção dos compostos fenólicos conjugados (CFC), 8 mL da fase aquosa residual proveniente do procedimento de partição descrito anteriormente foram submetidos à hidrólise ácida. Para isso, foram adicionados 8 mL de ácido clorídrico (HCl) 2 mol L^{-1}, e a mistura foi mantida em banho-maria a 80 °C por 1 h.

Após a hidrólise, foi realizado um procedimento de partição com hexano para remoção de possíveis interferentes gerados durante o processo (Tzima et al., 2020). Foram adicionados 8 mL de hexano ao extrato hidrolisado, seguido de homogeneização em vortex e posterior separação das fases. A fase aquosa foi recolhida e submetida a uma nova etapa de partição líquido-líquido utilizando a mistura de éter etílico e acetato de etila (1:1, v/v), conforme descrito anteriormente.

A fase orgânica obtida, contendo os compostos fenólicos liberados pela hidrólise, foi coletada, evaporada em banho-maria a 50 °C por 16 h e, posteriormente, ressuspendida em 10 mL de metanol para as análises subsequentes.

2.3.3 Determinação de compostos fenólicos

A determinação dos compostos fenólicos totais (CFT) foi realizada com base no método descrito por Souza et al. (2009), com adaptações. Alíquotas de 500 µL dos extratos foram misturadas a 500 µL de água ultrapura e 4,5 mL de solução de carbonato de sódio a 4% (m/v) contendo sulfato de cobre a 1% (v/v) (80 mmol L^{-1}). A mistura foi incubada em banho-maria a 40 °C por 15 min e, em seguida, foram adicionados 500 µL do reagente de Folin-Ciocalteu diluído na proporção de 1:2 (v/v). Após repouso por 10 min, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis a 760 nm. Todas as determinações foram realizadas em triplicata. Os resultados foram expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por grama de massa seca (mg EAG g^{-1} MS).

2.3.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo consideradas significativas as diferenças para $p < 0,05$.

3. Resultados e Discussão

Os resultados referentes aos teores de compostos fenólicos livres (CFL), compostos fenólicos conjugados (CFC) e compostos fenólicos totais (CFT) nas amostras de folhas e talos de erva-mate encontram-se apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Compostos fenólicos livres (CFL), compostos fenólicos conjugados (CFC) e compostos fenólicos totais (CFT) em amostras de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) (mg EAG g^{-1} MS).

	Amostras orgânicas				**Amostras convencionais**		
	CFL	**CFC**	**CFT**		**CFL**	**CFC**	**CFT**
O1	1,09 ± 0,05	2,42 ± 0,07	3,51	**C1**	3,92 ± 0,05	3,67 ± 0,45	7,59
O2	1,21 ± 0,02	2,17 ± 0,18	3,39	**C2**	4,00 ± 0,28	17,77 ± 0,11	21,77
O3	5,44 ± 0,51	19,63 ± 1,07	25,07	**C3**	6,04 ± 0,67	15,39 ± 1,50	21,43
O4	2,83 ± 0,27	11,60 ± 0,76	14,43	**C4**	3,59 ± 0,11	15,77 ± 0,91	19,35
O5	4,79 ± 0,29	15,82 ± 0,51	20,61	**C5**	4,02 ± 0,25	16,47 ± 0,77	20,49
O6	2,22 ± 0,07	5,33 ± 1,79	7,55	**C6**	3,47 ± 0,39	6,55 ± 0,54	10,02
O7	3,38 ± 0,08	14,47 ± 1,75	17,85	**C7**	2,59 ± 0,20	8,82 ± 0,76	11,41
O8	4,37 ± 0,03	15,98 ± 0,84	20,35	**C8**	3,23 ± 0,24	19,21 ± 1,09	22,43
				C9	4,08 ± 0,26	21,71 ± 0,45	25,79
				C10	3,08 ± 0,18	19,45 ± 1,40	22,53
Média	**3,17 ± 1,62^{a,A}**	**10,93 ± 6,75^{b,B}**	**14,10 ± 8,33**	**Média**	**3,80 ± 1,04^{a,A}**	**14,48 ± 5,26^{b,B}**	**18,28 ± 5,56**

Legenda: Letras minúsculas indicam as comparações estatísticas entre as frações fenólicas dentro do mesmo sistema de cultivo, enquanto letras maiúsculas indicam as comparações entre frações equivalentes de diferentes sistemas de cultivo. Letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste t ($p \geq 0,05$), ao passo que letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Tabela 2. Compostos fenólicos livres (CFL), compostos fenólicos conjugados (CFC) e compostos fenólicos totais (CFT) em amostras de talos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) (mg EAG g^{-1} MS).

	Amostras orgânicas				**Amostras convencionais**		
	CFL	**CFC**	**CFT**		**CFL**	**CFC**	**CFT**
O1	0,78 ± 0,03	1,19 ± 0,11	1,97	**C1**	1,78 ± 0,09	1,53 ± 0,25	3,31
O2	1,93 ± 0,40	0,91 ± 0,01	2,84	**C2**	2,37 ± 0,05	8,63 ± 0,53	11,00
O3	2,87 ± 0,15	7,59 ± 0,32	10,46	**C3**	2,75 ± 0,27	7,11 ± 0,09	9,85
O4	3,07 ± 0,26	2,06 ± 0,05	5,13	**C4**	2,75 ± 0,08	7,11 ± 0,65	9,86
O5	2,41 ± 0,17	7,40 ± 0,66	9,81	**C5**	3,34 ± 0,29	6,28 ± 0,40	9,62
O6	0,90 ± 0,04	5,03 ± 0,34	5,93	**C6**	1,47 ± 0,07	6,29 ± 0,50	7,76
O7	1,89 ± 0,07	5,16 ± 0,46	7,05	**C7**	1,38 ± 0,11	5,25 ± 0,38	6,63
O8	2,23 ± 0.03	6,01 ± 0,57	8,25	**C8**	1,51 ± 0,10	4,78 ± 0,14	6,28
				C9	1,64 ± 0,30	10,64 ± 0,20	12,28
				C10	1,39 ± 0,06	6,18 ± 0,75	7,57
Média	**2,01 ± 0,83^{a,A}**	**4,42 ± 2,69^{b,B}**	**6,43 ± 3,07**	**Média**	**2,04 ± 0,78^{a,A}**	**6,38 ± 1,78^{b,B}**	**8,41 ± 2,02**

Legenda: Letras minúsculas indicam as comparações estatísticas entre as frações fenólicas dentro do mesmo sistema de cultivo, enquanto letras maiúsculas indicam as comparações entre frações equivalentes de diferentes sistemas de cultivo. Letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste t ($p \geq 0,05$), ao passo que letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$). Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Analisando os dados apresentados, é possível observar uma variação nos teores de compostos fenólicos de 1,09 a 15,98 mg EAG g^{-1} MS nas folhas e de 1,97 a 12,28 mg EAG g^{-1} MS nos talos. De modo geral, os compostos fenólicos

conjugados (CFC) apresentaram concentrações superiores às dos compostos fenólicos livres (CFL) em ambas as estruturas vegetais.. Nas folhas, os teores de CFL variaram de 1,09 ± 0,05 a 6,04 ± 0,67 mg EAG g^{-1} MS, enquanto os de CFC variaram de 2,17 ± 0,18 a 21,71 ± 0,45 mg EAG g^{-1} MS. De forma semelhante, nos talos, os teores de CFL variaram de 0,78 ± 0,03 a 3,34 ± 0,29 mg EAG g^{-1} MS, enquanto os de CFC variaram de 0,91 ± 0,01 a 10,64 ± 0,20 mg EAG g^{-1} MS.

Esses resultados evidenciam a eficiência de métodos de fracionamento, como a hidrólise, para ampliar a recuperação de compostos fenólicos extraíveis por meio do acesso a frações associadas a outras moléculas da matriz vegetal. Esse comportamento está de acordo com os achados de Li et al. (2020), que demonstraram que a hidrólise ácida pode aumentar a extração de compostos fenólicos ao promover a liberação de frações ligadas por ligações glicosídicas, destacando seu potencial para aprofundar o conhecimento sobre a composição fenólica e ampliar as possibilidades de aplicação tecnológica desses compostos. Os valores observados abrangeram uma ampla faixa de variação, refletindo diferenças não apenas entre as frações avaliadas (livres e conjugadas), mas também entre as estruturas vegetais analisadas (folhas e talos), conforme discutido a seguir.

3.1 Estruturas vegetais

A comparação entre folhas e talos revelou que as folhas apresentam maiores concentrações de todas as frações de compostos fenólicos (CF), incluindo os compostos fenólicos totais (CFT), obtidos pela soma dos compostos fenólicos livres (CFL) e dos compostos fenólicos conjugados (CFC). Em média, as concentrações dos compostos fenólicos nas folhas foram de 1,5 a 2,5 vezes superiores às observadas nos talos (Tabelas 1 e 2).

Resultados semelhantes já foram relatados na literatura científica, em que as folhas apresentaram teores mais elevados de compostos fenólicos totais em comparação aos talos em amostras de *Crescentia cujete*, *Brassica oleracea L.* var. *acephala* e *Brassica oleracea* var. *italica* (Das et al., 2014; Rigueira et al., 2016; Faller & Fialho, 2010). Esse comportamento pode ser atribuído a diferentes fatores, incluindo a maturidade dos tecidos vegetais e a expressão de genes relacionados à síntese de proteínas e enzimas envolvidas na rota biossintética dos compostos fenólicos, especialmente a via da fenilalanina. Como consequência, folhas mais jovens tendem a apresentar maiores concentrações desses compostos quando comparadas a talos e raízes (Kolton et al., 2022).

Além de contribuírem para características como aroma, sabor e pigmentação, os compostos fenólicos desempenham papel importante na manutenção do equilíbrio oxidativo das plantas, particularmente em situações de estresse biótico e abiótico que promovem danos oxidativos nos tecidos vegetais (Kolton et al., 2022). A exposição à radiação ultravioleta pode influenciar significativamente esse comportamento, especialmente porque as folhas de plantas superiores estão mais suscetíveis a esse tipo de exposição. No caso da erva-mate, são descritos dois principais sistemas de cultivo: o cultivo a pleno sol, em que *Ilex paraguariensis* é a única espécie cultivada na área, e o cultivo consorciado, no qual a erva-mate é cultivada juntamente com espécies arbóreas de maior porte, como *Araucaria angustifolia* e espécies do gênero *Tabebuia*, reduzindo sua exposição direta à radiação solar (Penteado Junior & Goulart, 2019). Como essa variável não foi controlada no presente estudo, ela pode ter contribuído para os elevados desvios-padrão observados nas concentrações médias das frações fenólicas avaliadas.

3.2 Sistema de cultivo

Para avaliar o sistema de cultivo, foi calculada a média das amostras de cada grupo estudado (amostras orgânicas, n = 8, e amostras convencionais, n = 10). Em seguida, foi realizado um teste de comparação de médias para verificar a possível influência do método de cultivo sobre o teor de compostos fenólicos. A concentração média de compostos fenólicos totais (soma das frações livre e conjugada) nas folhas das amostras orgânicas foi de 14,10 ± 8,33 mg EAG g^{-1} MS, valor estatisticamente equivalente ao observado nas amostras convencionais (18,28 ± 5,56 mg EAG g^{-1} MS). O mesmo

comportamento foi observado para os talos, cujas médias foram de 6,43 ± 3,07 mg EAG g^{-1} MS para as amostras orgânicas e 8,41 ± 2,02 mg EAG g^{-1} MS para as convencionais. Comportamento semelhante também foi observado para as frações individuais (Tabelas 1 e 2).

Entretanto, embora não tenham sido observadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos orgânico e convencional, as médias das amostras convencionais foram superiores às das amostras orgânicas em todas as frações avaliadas. Destaca-se a fração de compostos fenólicos conjugados, cujas concentrações médias foram aproximadamente 33% superiores nas folhas e 44% superiores nos talos das amostras convencionais.

Existem diversos estudos na literatura científica comparando os teores de compostos fenólicos em amostras produzidas sob sistemas de cultivo orgânico e convencional. Embora frequentemente sejam relatadas concentrações mais elevadas desses compostos em amostras orgânicas (Arbos et al., 2010; Faller & Fialho, 2010; Rigueira et al., 2016; Ponder & Hallmann, 2019; Yu et al., 2018; Rahman et al., 2021), resultados divergentes também são encontrados na literatura. Faller e Fialho (2010), em um artigo de revisão, relatam que vegetais como batata, brócolis, tomate e repolho, bem como frutas como maçã, manga e tangerina, não apresentam diferenças significativas nos teores de compostos fenólicos entre os sistemas de cultivo orgânico e convencional. Essa observação é consistente com os resultados obtidos por Kazimierczak et al. (2014) para folhas de hortelã-pimenta e sálvia, assim como com os resultados observados no presente estudo.

Além disso, Lombardi-Boccia et al. (2003), ao avaliarem ameixa-amarela (*Prunus domestica L.*), tomilho, hortelã e *Plectranthus barbatus*, observaram maiores teores de compostos fenólicos em amostras provenientes do cultivo convencional. Em certa medida, esses resultados também corroboram os achados do presente trabalho, especialmente em relação à fração de compostos fenólicos conjugados, cujas concentrações médias foram sistematicamente superiores nas amostras convencionais. Esses resultados reforçam a importância da realização de análises de fracionamento na avaliação da influência do sistema de cultivo sobre os teores de compostos fenólicos.

O estudo de produtos comerciais está sujeito a elevada variabilidade nos resultados devido aos inúmeros fatores capazes de interferir no metabolismo vegetal e influenciar a composição de compostos fenólicos e outros fitoquímicos. Esses fatores atuam ao longo das etapas de cultivo, colheita e processamento e podem estar relacionados às características genéticas, ao sistema de cultivo, às condições ambientais, ao estádio de desenvolvimento da planta, entre outros aspectos (Arbos et al., 2010; Butiuk et al., 2016).

Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo demonstram que o sistema de cultivo, isoladamente, pode não ser um fator determinante para os teores de compostos fenólicos em amostras de erva-mate, abrindo espaço para discussões sobre outros fatores potencialmente envolvidos na modulação desse metabolismo. Uma das hipóteses propostas na literatura baseia-se no balanço carbono:nitrogênio (C:N), que busca explicar a predominância de compostos carbonados, incluindo os compostos fenólicos, em função da disponibilidade de nitrogênio no solo. De acordo com essa teoria, menores disponibilidades de nitrogênio favoreceriam o aumento da síntese de compostos carbonados (Hattas et al., 2017; Kazimierczak et al., 2014).

Entretanto, a adoção exclusiva dessa teoria levaria à expectativa de maiores teores de compostos fenólicos nas amostras orgânicas, o que não foi observado nas amostras de erva-mate avaliadas neste estudo. Esse comportamento pode estar relacionado à complexidade das rotas metabólicas envolvidas na biossíntese desses compostos. Como hipótese, uma maior disponibilidade de nitrogênio no solo, frequentemente associada ao cultivo convencional em razão da utilização de fertilizantes sintéticos, poderia favorecer a síntese de compostos nitrogenados na planta, incluindo a fenilalanina, principal precursor da rota fenilpropanoide. Essa interpretação evidencia as limitações da teoria do balanço C:N quando considerada isoladamente e sugere que outros fatores, como estresses bióticos e abióticos, também podem desempenhar papel relevante na modulação do metabolismo fenólico (Hattas et al., 2017; Faller & Fialho, 2010; Rahman et al., 2021).

Entre os fatores bióticos capazes de gerar estresse em plantas destacam-se o ataque de patógenos e insetos, a

proliferação de fungos e a herbivoria. Hattas et al. (2017) e Hanley et al. (2007) destacam que mecanismos de defesa relacionados ao estresse biótico, especialmente à herbivoria, estão associados ao teor de compostos fenólicos, cuja síntese pode ser intensificada como forma de aumentar a resistência da planta. Bergottini et al. (2017), ao analisarem o perfil microbiológico de solos cultivados com erva-mate, relataram a presença de bactérias pertencentes ao filo Firmicutes, algumas das quais apresentam potencial patogênico para *Ilex paraguariensis* e poderiam atuar como indutoras de respostas metabólicas relacionadas à síntese de compostos fenólicos. Dessa forma, seria esperado que produtos oriundos do cultivo orgânico, nos quais não são empregados pesticidas sintéticos para o controle de insetos e outros organismos, estivessem mais suscetíveis a esse tipo de estresse, favorecendo o aumento da síntese desses compostos. Entretanto, essa expectativa não foi confirmada pelos resultados obtidos neste estudo.

Uma forma típica de estresse abiótico, já mencionada anteriormente e particularmente relevante para a erva-mate, é a exposição à radiação ultravioleta (UV). Frizon et al. (2015) observaram que sistemas de cultivo consorciado, especialmente aqueles envolvendo *Araucaria angustifolia* e *Ilex paraguariensis*, apresentaram maiores teores de compostos fenólicos em comparação ao cultivo a pleno sol. Resultados semelhantes foram descritos por Coelho e Mariath (1996), que reportaram maiores concentrações de compostos fenólicos em plantas cultivadas sob sombreamento. Em contrapartida, Heck at al. (2008) verificaram que condições de cultivo a pleno sol, caracterizadas por maior incidência de radiação UV, resultaram em maiores teores de compostos fenólicos quando comparadas ao cultivo consorciado.

Não há informações sobre as condições de exposição à radiação solar das amostras avaliadas neste estudo. Entretanto, ao relacionar os resultados obtidos com os estudos previamente discutidos, pode-se hipotetizar uma possível sinergia entre fatores capazes de desempenhar papel relevante na síntese de compostos fenólicos. Nesse contexto, a combinação entre cultivo consorciado e práticas orgânicas, associadas à menor disponibilidade de nitrogênio e à maior suscetibilidade à herbivoria, poderia favorecer a síntese desses compostos. Por outro lado, o cultivo a pleno sol aliado a práticas convencionais, embora associado a menor pressão de herbivoria, também poderia criar condições favoráveis ao aumento dos teores fenólicos em resposta ao estresse causado pela maior incidência de radiação UV.

Os resultados consistentes observados entre folhas e talos, nos quais as amostras convencionais apresentaram concentrações médias de compostos fenólicos superiores às observadas nas amostras orgânicas, apesar da ausência de diferenças estatisticamente significativas, especialmente para a fração de compostos fenólicos conjugados, podem ser interpretados como indícios de uma influência sinérgica e sistêmica dos diferentes fatores de estresse aos quais a planta está submetida. Assim, a ausência de diferenças significativas entre os sistemas de cultivo pode estar relacionada à interação entre múltiplos fatores ambientais e de manejo, que atuam simultaneamente sobre o metabolismo fenólico da erva-mate.

4. Conclusão

O uso da hidrólise ácida permitiu o fracionamento dos compostos fenólicos livres e conjugados presentes na fração solúvel da erva-mate, proporcionando uma caracterização mais abrangente desses compostos em um alimento amplamente consumido na forma de infusão. Diferenças significativas foram observadas entre as estruturas vegetais avaliadas, com as folhas apresentando maiores teores de compostos fenólicos do que os talos em todas as frações estudadas, resultado possivelmente relacionado à maior exposição à radiação solar e às diferenças metabólicas entre essas estruturas. Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas entre amostras produzidas sob os sistemas de cultivo orgânico e convencional, indicando que o sistema de cultivo, isoladamente, pode não ser um fator determinante para os teores de compostos fenólicos em erva-mate comercial. Em conjunto com as evidências disponíveis na literatura, os resultados sugerem que a síntese desses compostos é influenciada por múltiplos fatores ambientais e de manejo, possibilitando hipotetizar uma interação entre práticas de cultivo e condições de exposição à radiação solar na modulação do metabolismo fenólico da espécie.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas, que tornaram possível a realização deste trabalho.

Referências

Araujo, F. F. Farias, D. P., Neri-Numa, I. A., & Pastore, G. M. (2021). Phenolic compounds and antioxidant activity of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) beverages. *Food Chemistry*, 338, 127135. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127535.

Arbos, K. A., Freitas, R. J. S., Stertz, S. C., & Dornas, M. F. (2010). Influence of processing on the bioactive compounds of mate tea. *Food Science and Technology*, 30(2), 501–507. https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000200031.

Aweke, A. T. (2025). Health and environmental attitudes as drivers of willingness to pay for organic meat: A study of Norwegian consumers. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101711. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101711.

Bento-Silva, A., Koistinen, V. M., Mena, P., Bronze, M. N., Hanhineva, K., Sahlstrøm, S., & Mikkelsen, M. S. (2020). Polyphenols and their metabolites in whole grain rye and oats. *European Journal of Nutrition*, 59, 1275–1299. https://doi.org/10.1007/s00394-019-01987-6

Barański, M., Srednicka-Tober, D., Volakakis, N., Seal, C., Sanderson, R., Stewart, G. B., Benbrook, C., Biavati, B., Markellou, E., et al. (2014). Higher antioxidant and lower cadmium concentrations and lower incidence of pesticide residues in organically grown crops: A systematic literature review and meta-analyses. *British Journal of Nutrition*, 112(5), 794–811. https://doi.org/10.1017/S0007114514001366.

Bergottini, V. M., Hervé, V., Sosa, D. A., Otegui, M. B., & Serral, P. G. (2017). Soil properties and yerba mate performance in agroforestry systems. *Applied Soil Ecology*, 109, 23–33. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.013.

Branco, C. S., Scola, G., Rodrigues, A. D., Cesio, V., Heinzen, H., Godoy, A., Funchal, C., Coutinho, A. S. & Salvador, M. (2013). Protective effects of mate tea in Wistar rats. *Antioxidants*, 2(3), 100–114. https://doi.org/10.3390/antiox2030100.

Butiuk, A. P., Martos, M. A., Adachi, O., & Hours, R. A. (2016). Study of the chlorogenic acid content in yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): Effect of plant fraction, processing step and harvesting season. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 3(1), 27–34. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.12.003.

Coelho, G. C., & Mariath, E. A. (1996). Inflorescences morphology of *Ilex paraguariensis*. *Feddes Repertorium*, 107, 19–30. https://doi.org/10.1002/fedr.19961070104.

Colling, K. M., Nave-Blodgett, J. E., Yerkes, B. D. & Lester, B. D. (2025). Organic and Non-Organic Consumer Knowledge, Values, and Information Seeking Behavior. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 69(1), 2049–2054. https://doi.org/10.1177/10711813251360000.

Cruz-Carrión, A., Azula, J. R., Muguerza, B., Mulero, M., Bravo, F. I., Arola-Arnal, A. & Suarez, M. (2023). Bioactive profile and antioxidant capacity of yerba mate. *Plants*, 12(1), 183. https://doi.org/10.3390/plants12010183.

Das, N., Islam, M. E., Jahan, N., Islam, M. S., Khan, A., Islam, M. R. & Parvin, M. S. (2014). Antioxidant and therapeutic relevance of phenolics. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 14, 1472. https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-45.

Debski, H., Wiczkowski, W., Szablinska-Piernik, J., & Horbowicz, M. (2021). Phenolics in radish sprouts. *Biomolecules*, 11(8), 1190. https://doi.org/10.3390/biom11081190.

Ding, Y., Morozova, K., Scampicchio, M., & Ferrentino, G. (2020). Advances in extraction of bioactive compounds. *Processes*, 8(8), 925. https://doi.org/10.3390/pr8080925.

Faller, A. L. K. & Fialho, E. (2010). Polyphenol content and antioxidant activity in organic and conventional foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6), 561–568. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.01.003.

Frizon, C. N. T., Oliveira, G. A., Perussello, C. A., Peralta-Zamora, P. G., Camlofski, A. M. O., Rossa, U. B. & Hoffmann-Ribani, R. (2015). Chemical properties of yerba mate. *LWT–Food Science and Technology*, 60, 795–802. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.030.

Gil-Martín, E., Forbes-Hernández, T., Romero, A., Cianciosi, D., Giampieri, F. & Battino M. (2022). Phenolic compounds and health. *Food Chemistry*, 378, 131918. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918.

Hanley, M. E., Lamont, B. B., Fairbanks, M. M. & Rafferty, C. M. (2007). Plant structural traits and their role in anti-herbivore defence. Perspectives in Plant Ecology, *Evolution and Systematics*, 8(4), 157-178. https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.01.001.

Hattas, D., Scogings, P. F. & Julkunen-Tiitto, R. (2017). Does the Growth Differentiation Balance Hypothesis Explain Allocation to Secondary Metabolites in *Combretum apiculatum*, an African Savanna Woody Species? *Journal of Chemical Ecology*, 43(2), 153-163. https://doi.org/10.1007/s10886-016-0808-6.

Heck, C. I., Schmalko, M. & Mejia, E. G. (2008). Effect of growing and drying conditions on the phenolic composition of mate teas (*Ilex paraguariensis*). *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 56, 8394-8403. https://doi.org/10.1021/jf801748s.

Hurtado-Barroso, S., Tresserra-Rimbau, A., & Vallverdú-Queralt, A. (2019). Organic food and the impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(4), 704-714. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1394815.

Jakobek, L. (2015). Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins. *Food Chemistry*, 175, 556-567. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.013.

Kazimierczak, R., Hallmann, E. & Rembiałkowska, E. (2014). Effects of organic and conventional production systems on the content of bioactive substances in four species of medicinal plants. *Biological Agriculture & Horticulture*, 31(2), 118-127. https://doi.org/10.1080/01448765.2014.977948.

Kim, K., Tsao, R., Yang, R. & Cui, S. W. (2006). Phenolic acid profiles and antioxidant activities of wheat bran extracts and the effect of hydrolysis conditions. *Food Chemistry*, 95, 466-473. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.032.

Kolton, A., Dlugosz-Grochowska, O., Wojciechowska, R. & Czaja, M. (2022). Biosynthesis Regulation of Folates and Phenols in Plants. *Scientia Horticulturae*, 291, 110561. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110561.

Krygier, K., Sosulski, F. & Hogge L. (1982). Free, esterified, and insoluble-bound phenolic acids. 1. Extraction and purification procedure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30, 330-334. https://doi.org/10.1021/jf00110a028.

Li, W., Yang, R., Ying, D., Yu, J., Sanguansri, L. & Augustin, M. A. (2020). Analysis of polyphenols in apple pomace: A comparative study of different extraction and hydrolysis procedures. *Industrial Crops and Products*, 147, 112250. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112250.

Lombardi-Boccia, G., Lucarini, M., Lanzi, S., Aguzzi, A. and Cappelloni, M. (2003). Nutrients and antioxidant molecules in yellow plums (Prunus domestica L.) from conventional and organic productions: a comparative study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(1), 90-94. https://doi.org/10.1021/jf0344690.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2003). *Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003: Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências*. Diário Oficial da União.

Meinhart, A. D., Bizzotto, C. S., Ballus, C. A., Rybka, A. C. P., Sobrinho, M. R., Cerro-Quintana, R. S., Teixeira-Filho, J. & Godoy, H. T. (2010). Methylxanthines and Phenolics Content Extracted during the Consumption of Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) Beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 2188-2193. https://doi.org/10.1021/jf903781w.

Mihaylova, D., Popova, A., Desseva, I., Dincheva, I. & Tumbarski, Y. (2023). Valorization of Peels of Eight Peach Varieties: GC–MS Profile, Free and Bound Phenolics and Corresponding Biological Activities. *Antioxidants*, 12(1), 205. https://doi.org/10.3390/antiox12010205.

Penteado Junior, J. F. & Goulart, I. C. G. R. (2019). *Erva 20: Sistema de produção para erva-mate*. Embrapa Florestas.

Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica. [Free ebook]*. Santa Maria. Editora da UFSM.

Pérez-Jiménez, J., Díaz-Rubio, M. E. & Saura-Calixto, F. (2013). Non-extractable polyphenols, a major dietary antioxidant: occurrence, metabolic fate and health effects. *Nutrition Research Reviews*, 26(2), 118-129. https://doi.org/10.1017/s0954422413000097.

Ponder, A. & Hallmann, E. (2019). The effects of organic and conventional farm management and harvest time on the polyphenol content in different raspberry cultivars. *Food Chemistry*, 301, 125295. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125295.

Rahman, S. M. E., Mele, M. A., Lee, Y. & Islam, M. Z. (2021). Consumer Preference, Quality, and Safety of Organic and Conventional Fresh Fruits, Vegetables, and Cereals. *Foods*, 10(1), 105. https://doi.org/10.3390/foods10010105.

Rigueira, G.D.J., Bandeira, A. V. M., Chagas, C. G. O. & Milagres, R. C. R. M. (2016). Antioxidant activity and phenolic content in kale (brassica oleracea l. var. acephala) submitted to different cropping systems and preparation methods. *Semina: Ciências Biológicas e da Saúde*, 37(2), 3-12. https://doi.org/10.5433/1679-0367.2016v37n2p3.

Risemberg, R. I. C. et al. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*, 7(1), e0171675. https://eacademica.org/eacademica/article/view/675.

Santetti, G. S., Dacoreggio, M. V., Inácio, H. P., Biduski, B., Hoff, R. B., Freire, C. B. F., Gutkoski, L. C. & Amboni, R. D. M. C. (2021). The addition of yerba mate leaves on bread dough has influences on fermentation time and the availability of phenolic compounds? *LWT - Food Science and Technology*, 146, 111442. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111442.

Shitsuka, R. et al. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2ed). Editora Érica.

Song, Y., Cao, J., Cao, F. & Erzheng, S. (2025). A systematic review on the yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 142, 107466. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107466.

Souza, M. M., Recart, V. M., Rocha, M., Cipolatti, E. P. & Badiale-Furlong, E. (2009). Study on the extracting conditions of phenolic compounds from onion (Allium cepa L.). *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 68(2),192-200. https://doi.org/10.53393/rial.2009.v68.32717.

Strieder, M. M., Oliveira, I. L., Bragagnolo, F. S., Sanches, V. L., Pizani, R. S., Mesquita, L. M. S. & Rostagno, M. A. (2025). Consistency of Phenolic Compounds in Plant Residues Parts: A Review of Primary Sources, Key Compounds, and Extraction Trends. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73, 11515-11534. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c01868.

Tixier, P., Loeillet, D., Coulis, M., Lescot, T. & de Bellaire L. L. (2022). Isotopes Don't Lie, differentiating organic from conventional banana (Musa AAA, Cavendish subgroup) fruits using C and N stable isotopes. *Food Chemistry*, 394, 133491. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133491.

Tzima, K., Brunton, N. P. & Rai, D. K. (2020). Evaluation of the impact of chlorophyll removal techniques on polyphenols in rosemary and thyme by-products. *Journal of Food Biochemistry*, 44(3), e13148. https://doi.org/10.1111/jfbc.13148.

Vallverdú-Queralt, A. & Lamuela-Raventós, R. M. (2016). Foodomics: A new tool to differentiate between organic and conventional foods. *Electrophoresis*, 37(13), 1784-1794. https://doi.org/10.1002/elps.201500348.

Wang, Z., Li, S., Ge, S. & Lin, S. (2020). A review of distribution, extraction methods and health benefits of bound phenolics in food plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(11), 3330-3343. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06574.

Yu, X., Guo, L., Jiang, G., Song, Y. & Muminov, M. A. (2018). Advances of organic products over conventional productions with respect to nutritional quality and food security. *Acta Ecologia Sinica*, 38(1), 53-60. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.01.009.

Zhang, B., Zhang, Y., Li, H., Deng, Z. & Tsao R. (2020). A review on insoluble-bound phenolics in plant-based food matrix and their contribution to human health with future perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 347-362. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.029.