



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

VITOR ALMEIDA MARENGO

**INFLUÊNCIA TEMPORAL E GEOGRÁFICA NA
COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MEL DE ABELHAS-
SEM-FERRÃO AVALIADA POR QUIMIOMETRIA**

VITOR ALMEIDA MARENGO

**INFLUÊNCIA TEMPORAL E GEOGRÁFICA NA
COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MEL DE ABELHAS-
SEM-FERRÃO AVALIADA POR QUIMIOMETRIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência de Alimentos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Wilma Aparecida Spinosa

Coorientadora: Dr.^a Jaqueline Munise Guimarães da Silva

Londrina
2026

Marengo, Vitor Almeida.

Influência temporal e geográfica na composição físico-química de mel de abelhas-sem-ferrão avaliada por quimiometria / Vitor Almeida Marengo. - Londrina, 2026.
37 f.

Orientador: Wilma Aparecida Spinosa.

Coorientador: Jaqueline Munise Guimarães da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, 2026.

Inclui bibliografia.

1. meliponicultura - Tese. 2. quimiometria - Tese. 3. análise multivariada - Tese. I. Spinosa, Wilma Aparecida. II. Silva, Jaqueline Munise Guimarães da. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos. IV. Título.

CDU 641.1

VITOR ALMEIDA MARENGO

**INFLUÊNCIA TEMPORAL E GEOGRÁFICA NA
COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MEL DE ABELHAS-
SEM-FERRÃO AVALIADA POR QUIMIOMETRIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência de Alimentos.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^a Wilma Aparecida Spinosa
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Paulo Henrique Março
Universidade Tecnológica Federal do Paraná -
UTFPR

Prof. Dr. Pedro Henrique Freitas Cardines
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 23 de abril de 2026.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Wilma Aparecida, minha orientadora, por ter acreditado em meu potencial e por me incentivar constantemente ao longo desta trajetória.

À Dra. Jaqueline Munise Guimarães da Silva, por auxiliar em diversas etapas deste trabalho e por mostrar que, com planejamento e consistência, seria possível alcançar os objetivos desta pesquisa.

À minha esposa, Viviane Fujita Marengo, e ao meu filho, Davi, por me apoiarem e me darem forças para a conclusão desta etapa.

Aos professores do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual de Londrina, que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Dedico este trabalho aos meus familiares, em
especial, minha esposa e meu filho.

RESUMO

MARENGO, Vitor Almeida. **Influência temporal e geográfica na composição físico-química de mel de abelhas-sem-ferrão avaliada por quimiometria**. 2026. 42 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências de Alimento) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

O mel é um dos alimentos naturais de origem animal mais consumido no mundo, sendo amplamente valorizado por suas características nutricionais e funcionais. Apesar disso, ainda são escassos os estudos que avaliam conjuntamente os efeitos temporais e geográficos sobre o perfil físico-químico de méis de abelhas-sem-ferrão, evidenciando uma lacuna no entendimento da variabilidade desses produtos. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência dos fatores temporais (ano de produção) e geográficos sobre o perfil físico-químico de méis de abelhas-sem-ferrão produzidos no estado do Paraná, Brasil. Para tanto, foram compilados dados físico-químicos de 43 amostras de mel produzidas entre 2019 e 2023, obtidos a partir do banco de dados do Laboratório de Análise de Alimentos da Universidade Estadual de Londrina. As variáveis avaliadas incluíram pH, sólidos solúveis, açúcares redutores, umidade, acidez total, teor de cinzas e hidroximetilfurfural (HMF). Os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*, PCA), visando investigar a influência dos fatores temporais e geográficos sobre as amostras. Os resultados demonstraram que o fator temporal exerceu influência sobre o perfil físico-químico dos méis, uma vez que as amostras produzidas em 2023 formaram um agrupamento distinto dos demais anos avaliados. Em contrapartida, as amostras coletadas entre 2019 e 2023 apresentaram elevada sobreposição nos *scoresplots*, indicando perfis físico-químicos semelhantes. A análise dos valores de *loading* revelou que parâmetros como acidez total, umidade e teor de cinzas contribuíram para a diferenciação das amostras de 2023, sugerindo a influência de condições climáticas e ambientais específicas desse período. Por outro lado, o fator geográfico não promoveu uma discriminação clara das amostras, uma vez que méis provenientes de diferentes localidades apresentaram elevada similaridade físico-química. Conclui-se que o ano de produção pode influenciar o perfil físico-químico de méis de abelhas-sem-ferrão, enquanto a localização geográfica, nas condições avaliadas, não exerceu efeito significativo sobre os parâmetros analisados. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo da qualidade desses produtos e ampliam o conhecimento sobre os fatores que influenciam sua composição. Como perspectivas futuras recomendam-se a aplicação de abordagens metabolômicas e cromatográficas de alta resolução, associadas a dados climáticos e botânicos, para uma compreensão mais abrangente da influência temporal e geográfica sobre a composição química dos méis de abelhas-sem-ferrão.

Palavras-chave: análise multivariada; méis; meliponicultura; perfil físico-químico.

ABSTRACT

MARENGO, Vitor Almeida. **Temporal and geographic effects on the physicochemical composition of stingless bee honey revealed by chemometric analysis**. 2026. 42 p. Dissertation (Post-Graduate Program in Food Science) – Center for Agricultural Sciences, State University of Londrina, Londrina, 2026.

Honey is one of the most widely consumed animal-derived natural foods worldwide and is highly valued for its nutritional and functional properties. Despite its importance, studies jointly evaluating the temporal and geographic effects on the physicochemical profile of stingless bee honeys remain scarce, highlighting a gap in the understanding of the variability of these products. Therefore, the present study aimed to evaluate the influence of temporal (year of production) and geographic factors on the physicochemical profile of stingless bee honeys produced in Paraná State, Brazil. For this purpose, physicochemical data from 43 honey samples produced between 2019 and 2023 were compiled from the Food Analysis Laboratory database at the State University of Londrina. The evaluated variables included pH, soluble solids, reducing sugars, moisture, total acidity, ash content, and hydroxymethylfurfural (HMF). The data were subjected to Principal Component Analysis (PCA) to investigate the influence of temporal and geographic factors on the samples. The results demonstrated that the temporal factor influenced the physicochemical profile of the honeys, as samples produced in 2023 formed a distinct cluster compared to those from the other years evaluated. In contrast, samples collected between 2019 and 2023 showed substantial overlap in the score plots, indicating similar physicochemical profiles. Loading analysis revealed that total acidity, moisture, and ash content were the main variables contributing to the differentiation of the 2023 samples, suggesting the influence of specific climatic and environmental conditions during that year. Conversely, the geographic factor did not promote a clear discrimination of the samples, as honeys from different locations exhibited high physicochemical similarity. In conclusion, the year of production may influence the physicochemical profile of stingless bee honeys, whereas geographic location, under the conditions evaluated, did not significantly affect the analyzed parameters. These findings reinforce the importance of continuous quality monitoring of these products and expand current knowledge regarding the factors influencing their composition. Future studies should incorporate metabolomic and high-resolution chromatographic approaches, combined with climatic and botanical data, to provide a more comprehensive understanding of the temporal and geographic influences on the chemical composition of stingless bee honeys.

Keywords: multivariate analysis; honeys; meliponiculture; physicochemical profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Score plot PC1 x PC2 (PCA) das 43 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.	27
Figura 2. Score plot PC2 x PC3 (PCA) das 43 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.	29
Figura 3. Score plot PC1 x PC2 (PCA) das 39 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão coletadas em diferentes regiões paranaenses (metropolitana, norte e sudeste) com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.	31
Figura 4. Score plot PC2 x PC3 (PCA) das 39 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão coletadas em diferentes regiões paranaenses (metropolitana, norte e sudeste) com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
HMF	Hidroximetilfurfural
PC	<i>Principal Component</i>
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLS-DA	<i>Partial Least Squares Discriminant Analysis</i>
VIP	<i>Variable Importance Projection</i>

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	<i>Méis de abelhas-sem-ferrão</i>	13
2.2.1.	<i>Análise quimiométrica</i>	15
3.	JUSTIFICATIVA	17
4.	OBJETIVOS	18
4.1.	<i>Objetivo Geral</i>	18
4.2.	<i>Objetivos específicos</i>	18
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	19
5.1.	<i>Amostragem</i>	19
5.2.	<i>Descrição das metodologias aplicadas nas análises físico-químicas</i>	20
5.3.	<i>Análises quimiométricas</i>	25
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
7.	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

O mel de abelhas-sem-ferrão é um produto natural de elevado valor nutricional e funcional, apresentando crescente potencial econômico e científico (Ressutte et al., 2025a; Sharin et al., 2024). Estudos têm destacado suas múltiplas atividades químicas e biológicas, o que tem consolidado esse produto como um alimento de interesse biotecnológico em expansão (Alves et al., 2024).

Nesse contexto, a bioatividade do mel de abelhas-sem-ferrão, evidenciada por atividades antioxidantes e antimicrobianas, justifica a crescente demanda científica e sensorial por esse produto (Alves et al., 2024; Da Silva et al., 2013; Zaldivar-Ortega et al., 2024). Ainda assim, embora os bioensaios indiquem seu potencial terapêutico e biológico, são necessárias análises que assegurem a autenticidade da amostra, bem como sua origem botânica e pureza (Ressutte et al., 2025b).

A caracterização físico-química do mel de abelhas-sem-ferrão tem como objetivo avaliar parâmetros essenciais para a autenticidade e o controle de qualidade desse produto, como potencial hidrogeniônico (pH), sólidos solúveis, açúcares redutores, umidade, atividade de água, hidroximetilfurfural (HMF) e cinzas (Zheng et al., 2025).

Méis de abelhas-sem-ferrão provenientes de determinadas regiões, como províncias asiáticas, apresentam parâmetros bem definidos, os quais permitem a validação de sua origem (Zheng et al., 2025). Adicionalmente, adulterações, como a introdução de xaropes, podem ser inicialmente verificadas pelo teor de açúcares (Ressutte et al., 2025a).

Apesar da crescente valorização do mel de abelhas-sem-ferrão e da consequente demanda por autenticidade e controle de qualidade, ainda existem lacunas pouco exploradas na literatura. Destaca-se, em especial, a necessidade de avaliar os fatores que influenciam a composição físico-química desse produto, incluindo os aspectos temporais relacionados ao mês e ao ano de produção, bem como os fatores geográficos.

Considerando que a fonte vegetal da qual a abelha coleta néctar é condicionada pelas estações do ano (Sharin et al., 2024) e que existem diferenças entre méis de abelhas-sem-ferrão provenientes de diferentes locais (Phonmat et al., 2025a), esta dissertação avaliou a influência do tempo e do local de coleta na composição físico-química do mel de abelhas-sem-ferrão, tendo como abordagem comparativa as análises quimiométricas, particularmente a Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*). Para tanto, foi utilizada uma base de dados de medidas químicas de mel de abelhas-sem-ferrão do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual de Londrina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Méis de abelhas-sem-ferrão*

As abelhas-sem-ferrão pertencem à tribo *Meliponini*, um grupo de abelhas com aproximadamente 605 espécies descritas, encontradas naturalmente em regiões tropicais e subtropicais (Engel et al., 2023). Em nível global, nos ambientes tropicais e subtropicais, as espécies da tribo *Meliponini* são popularmente conhecidas como abelhas indígenas ou abelhas-sem-ferrão devido à atrofia do ferrão. Assim, tal atrofia deixa o ferrão não funcional, ou seja, o ferrão não atua como arma de defesa (Engel et al., 2023).

As abelhas-sem-ferrão exercem um papel fundamental no contexto cultural, nutricional e ecológico, atuando como importantes polinizadoras de diversas plantas tropicais, tanto silvestres quanto cultivadas. Além disso, seus produtos, como o mel, pólen e cerúmen, são tradicionalmente utilizados para fins medicinais desde a cultura maia. O uso deste produto natural se dá principalmente em função de suas reconhecidas propriedades terapêuticas devido a compostos bioativos como os flavonoides (Zaldivar-Ortega et al., 2024).

O mel de abelhas-sem-ferrão tem ganhado popularidade devido ao seu sabor característico, textura mais fluida e valor nutricional (Mduda et al., 2025). Esse mel é processado e armazenado em potes de cerúmen, formados por uma mistura de cera produzida pelas abelhas-sem-ferrão e resinas vegetais (Mduda et al., 2025). Em razão desse modo particular de processamento e armazenamento, este tipo de mel é conhecido como “mel de pote”, o que o diferencia do mel de abelhas com ferrão, tradicionalmente armazenado em favos de cera pura (Mduda et al., 2025).

As abelhas-sem-ferrão apresentam ampla diversidade morfológica e comportamental, a qual se reflete diretamente nas características do mel produzido. Assim, o mel de pote pode apresentar variações expressivas em sua composição físico-química e sensorial, dependendo da abelha produtora (Mduda et al., 2025). Além dos aspectos morfológicos das abelhas-sem-ferrão, o local, bem como a estação de ano, são fatores determinantes na composição físico-química do mel de abelha-sem-ferrão, isto porque alguns locais podem apresentar maiores circulações de ventos, além das estações do ano que condicionam o desenvolvimento vegetal, e consequentemente o néctar sintetizado (Phonmat et al., 2025b; Sharin et al., 2024).

Por ser o alimento de origem animal mais utilizado em nível mundial, as características físico-químicas do mel (abelhas com ferrão, conhecidas como *Apis mellifera*)

estão bem definidas, todavia, tratando-se do mel de abelha-sem-ferrão, tais características ainda têm sido estudadas para se estabelecer normativas e parâmetros peculiares a este produto (Zhang et al., 2025). Diversos estudos vêm reportando tais parâmetros físico-químicos no mel de abelha-sem-ferrão (Ressutte et al., 2025; Zheng et al., 2025).

Dentre as justificativas que tornam os parâmetros físico-químicos uma análise básica essencial, destaca-se a correlação entre tais parâmetros com aspectos sensoriais, como, o valor de pH e o sabor do mel de abelha-sem-ferrão (Grando et al., 2023). Conforme Mduda et al. (2025), os parâmetros físico-químicos servem para avaliar a pureza (a partir do teor de açúcar visto que uma das principais fontes de adulteração é a adição de xaropes e sacarose nestes méis), maturação (avaliando-se o teor de HMF), prazo de validade (por meio da atividade de água), composição mineral (por meio do percentual de cinzas) e frescor. Pesquisas como as de Grando et al. (2023) reportam a dependência da qualidade e do sabor do mel em relação aos parâmetros físico-químicos.

A atividade da água, a umidade, o pH e a acidez são fatores relevantes na conservação de alimentos, atuando como indicativos da qualidade do produto, e por essa razão devem ser essencialmente analisados (Grando et al., 2023).

Embora a atividade da água não seja um parâmetro físico exigido pelas normas nacionais e internacionais segundo (Grando et al., 2023), tal medida é essencial para avaliação microbiológica. Em suma, a atividade de água auxilia na investigação de ferramentas para microbiologia preditiva (Grando et al., 2023).

Comparado ao mel comum produzido por *Apis mellifera*, o mel de abelha-sem-ferrão apresenta um teor de umidade superior ao mel tradicional, o que corrobora a fermentação natural do mel de abelha-sem-ferrão, bem como um pH mais ácido (Mduda et al., 2025).

Considerando que o mel de abelha-sem-ferrão, diferentemente de décadas passadas, nas quais era apenas uma fonte alimentar e, portanto, avaliado majoritariamente por questões sensoriais (Biluca et al., 2014), atualmente, em 2026, a crescente demanda por produtos naturais bioativos faz com que novas pesquisas sobre esse tipo de mel sejam realizadas. Nesse sentido, análises quimiométricas representam uma abordagem apropriada para considerar diferentes variáveis, como os parâmetros físico-químicos, sob diferentes aspectos, como o temporal e geográfico.

2.2.1. *Análise quimiométrica*

A quimiometria é a aplicação de análises estatísticas multivariadas em dados químicos (Ferreira, 2015). Um de seus objetivos é extrair informações significativamente relevantes de um conjunto de dados complexos (Ferreira, 2015). Assim, a quimiometria permite a análise simultânea de múltiplas variáveis, a exploração de grandes volumes de dados e a identificação das variáveis que mais contribuem para a diferenciação entre amostras ou grupos (Ferreira, 2015). Dessa forma, essas ferramentas tornam-se fundamentais para a interpretação de dados químicos, nos quais diferentes variáveis são analisadas concomitantemente (Ferreira, 2015).

Análises quimiométricas como Análise Multibloco, Análise Discriminante Linear, e Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (*Partial Least Squares Discriminant Analysis* – PLS-DA) foram aplicadas em méis brasileiros de abelhas-sem-ferrão para investigar e comparar sua composição química (Ressutte et al., 2025b).

O estudo de Ressutte et al. (2025b) integrou dados de análises melissopalinológicas, físico-químicas, perfil de açúcares, compostos fenólicos e infravermelhos com análises quimiométricas. Essas abordagens permitiram discriminar e classificar as amostras quanto à origem entomológica e geográfica. Os resultados demonstraram que a origem entomológica foi o principal fator responsável pelas diferenças observadas entre os méis, ressaltando a importância das análises quimiométricas no estudo de méis de abelhas-sem-ferrão.

Além da pesquisa descrita por Ressutte et al. (2025b), outras pesquisas reportam abordagens quimiométricas relevantes no estudo de mel de abelhas-sem-ferrão, como a de Raypah et al. (2022). Os autores desenvolveram e aplicaram uma abordagem simples, rápida e não destrutiva em amostras de méis de abelhas-sem-ferrão, baseada na combinação da espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) com ferramentas quimiométricas, para avaliar níveis de adulteração em mel de abelhas-sem-ferrão. Para isso, três amostras de méis de abelhas-sem-ferrão de alta qualidade foram analisadas diretamente, sem preparo prévio (Raypah et al., 2022).

Dentre essas ferramentas quimiométricas, destaca-se a Análise de Componentes Principais (Principal Component Analysis), uma análise estatística amplamente utilizada em dados químicos e em diversas áreas do conhecimento, como na comparação de extratos vegetais (Alexandre et al., 2022), na avaliação da atividade larvicida (Mannochio-Russo et al., 2023) e na investigação da influência da extração sobre a composição fitoquímica de cafés

(Pandhi & Kumar, 2025), entre outras pesquisas.

A PCA tem como objetivo reduzir a dimensionalidade dos dados, preservando ao máximo a variabilidade original do conjunto analisado. Para isso, transforma um grande número de variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais, cada um explicando uma parcela da variância total dos dados (Ferreira, 2015).

Portanto, a PCA é tida como uma análise não supervisionada, pois não utiliza informações prévias sobre grupos ou classes das amostras. Assim, a distribuição das amostras ocorre exclusivamente com base nos dados experimentais, sem considerar previamente a que grupo cada amostra pertence (Ferreira, 2015). Dessa maneira, os agrupamentos ou separações observadas emergem naturalmente das similaridades e diferenças químicas entre as amostras.

Sendo assim, na PCA as amostras são projetadas em um espaço multidimensional de acordo com as variáveis que mais contribuem para a variância dos dados. As distâncias entre os pontos refletem o grau de similaridade ou dissimilaridade entre os perfis analisados, de modo que amostras próximas indicam composições químicas semelhantes, enquanto amostras distantes sugerem diferenças significativas. Assim, a PCA possibilita a identificação de padrões, tendências, agrupamentos e possíveis valores atípicos de forma objetiva e visual (Ferreira, 2015).

A interpretação dos resultados da PCA baseia-se na análise conjunta dos gráficos de escores (*score plot*) e de cargas (*loadings*). O *score plot* permite visualizar a distribuição e o agrupamento das amostras, enquanto os *loadings* indicam quais variáveis são responsáveis pelas separações observadas. A análise integrada desses resultados possibilita uma compreensão aprofundada das relações entre amostras e variáveis, contribuindo para interpretações mais robustas e confiáveis dos dados.

De modo geral, a integração entre análises metabolômicas e ferramentas quimiométricas representa uma estratégia essencial para o tratamento e interpretação de dados complexos, permitindo a otimização de experimentos (Pandhi; Kumar, 2025), a identificação de padrões químicos relevantes (Raypah et al., 2022) e a descoberta de informações biológicas e químicas que dificilmente seriam observadas por meio de análises univariadas (Ferreira, 2015; Mannocho-Russo et al., 2023).

3. JUSTIFICATIVA

A caracterização físico-química do mel de abelhas-sem-ferrão representa um tema de elevada relevância científica, tecnológica e socioeconômica, considerando a crescente valorização desse produto tanto no mercado nacional quanto internacional (Ressutte et al., 2025b; Zheng et al., 2025). No entanto, trata-se de um alimento cuja composição apresenta elevada variabilidade, fortemente influenciada por fatores ambientais e temporais. Nesse contexto, a avaliação sistemática da influência do tempo, especialmente mês e ano, e do local de coleta sobre as características físico-químicas do mel é essencial para compreender os padrões de variação natural associados à sazonalidade floral, às condições climáticas e à dinâmica dos ecossistemas onde as colônias estão inseridas.

A origem geográfica do mel está diretamente relacionada às características edafoclimáticas, à diversidade botânica e às condições ambientais locais, fatores que impactam significativamente parâmetros físico-químicos fundamentais, como pH, teor de umidade, sólidos solúveis, açúcares redutores, atividade de água e teor de hidroximetilfurfural. Da mesma forma, a variação temporal pode refletir alterações na disponibilidade de néctar, no estágio fenológico das plantas e em eventos climáticos extremos, influenciando a qualidade, estabilidade e autenticidade do produto ao longo do tempo. Apesar dessa complexidade, ainda são escassos os estudos que abordam de forma integrada e longitudinal a influência desses fatores na composição físico-química do mel de abelhas-sem-ferrão.

Assim, o desenvolvimento deste estudo justificou-se pela necessidade de gerar dados científicos consistentes e robustos que permitem compreender a variabilidade do mel de abelhas-sem-ferrão.

4. OBJETIVOS

4.1. *Objetivo Geral*

Avaliar a influência temporal (ano de produção) e geográfica (regiões paranaenses) sobre os parâmetros físico-químicos do mel de abelhas-sem-ferrão, de modo a integrar dados analíticos com análises quimiométricas.

4.2. *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- Concatenar os resultados das análises físico-químicas (pH, sólidos solúveis, açúcares redutores, umidade e teor de HMF) realizadas no Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Estadual de Londrina, sem recorte temporal e sem seleção de espécie de abelha;
- Comparar, por meio de PCA, os parâmetros físico-químicos do mel de abelhas-sem-ferrão produzidos em diferentes anos de produção, identificando possíveis variações associadas ao fator temporal;
- Identificar, por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), os parâmetros físico-químicos responsáveis pela discriminação de méis de abelhas-sem-ferrão em função da região de coleta no estado do Paraná.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Amostragem

As informações referentes às caracterizações físico-químicas dos méis de abelhas-sem-ferrão (Tabela 1 e Tabela 2) foram obtidas a partir do banco de dados do Laboratório de Análise de Alimentos, vinculado ao Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos (DCTA), localizado no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Trata-se de um laboratório de referência na área de análise de alimentos, com ampla experiência na caracterização físico-química de méis, incluindo certificação para a realização de concursos estaduais de qualidade de méis.

Considerando o elevado volume de análises já realizadas e a confiabilidade técnica dos dados gerados, o banco de dados desse laboratório foi selecionado como fonte de informação para o presente estudo. Assim, foram compiladas e avaliadas informações físico-químicas de méis provenientes de diferentes espécies de abelhas-sem-ferrão, incluindo *Tetragona clavipes*, *Tetragona angustula*, *Scaptotrigona bipunctata*, *Melipona quadrifasciata* e *Plebeia droriana*.

Na Tabela 1 são apresentadas todas as informações das amostras extraídas do banco de dados do Laboratório de Análise de Alimentos. Destaca-se que a escolha destas amostras teve como filtro principal os méis que foram submetidos a mesma metodologia e equipamento.

As amostras analisadas foram oriundas de diferentes municípios paranaenses, com destaque para Cambé, Califórnia, Araçuaí, Tamarana, Londrina, São José dos Pinhais, Ribeirão Claro, Jandaia do Sul, Curitiba e Prudentópolis, além de outros municípios do estado do Paraná. Ressalta-se que os méis foram coletados e analisados de forma sistemática, seguindo metodologia da *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC) (George W. Latimer Jr., 2016), desde o ano de 2019, o que conferiu robustez temporal ao conjunto de dados.

As variáveis físico-químicas consideradas neste estudo incluíram pH, sólidos solúveis, açúcares redutores, umidade e teor de HMF. Estes são parâmetros amplamente utilizados para a avaliação da qualidade, autenticidade e estabilidade de méis.

5.2. *Descrição das metodologias aplicadas nas análises físico-químicas*

As análises físico-químicas dos méis realizadas entre 2019 até 2023 foram conduzidas conforme metodologias padronizadas da AOAC (George W. Latimer Jr., 2016).

O pH foi determinado pela diluição de 10 g de mel em 75 mL de água destilada, seguida de leitura em pHmetro digital. A acidez foi obtida por titulação, sendo expressa como a soma da acidez livre (titulação com NaOH 0,05 N até pH 8,5) e da acidez lactônica (retrotitulação com HCl 0,05 N até pH 8,3).

A umidade foi determinada por meio de tabela de conversão baseada no índice de refração. Os sólidos solúveis totais e o índice de refração foram obtidos por leitura direta em refratômetro digital calibrado a 20 °C. O teor de hidroximetilfurfural (HMF) foi determinado por método espectrofotométrico, após clarificação da amostra com soluções de Carrez I e II, ajuste de volume e filtração.

Os açúcares redutores foram quantificados por titulação com solução de Fehling, baseada na redução de íons cúpricos (Cu^{2+}) a óxido cuproso (Cu_2O) em meio alcalino, utilizando azul de metileno como indicador. O teor de cinzas foi determinado por incineração das amostras em mufla a 550 °C até peso constante, seguido de resfriamento em dessecador e pesagem.

Tabela 1. Caracterização físico-química de amostras de mel de abelhas-sem-ferrão produzidas por diferentes espécies e coletadas em distintas regiões do estado do Paraná, Brasil, ao longo de diferentes anos de colheita. Os parâmetros avaliados incluíram pH, sólidos solúveis (°Brix), umidade (%), acidez total (mEq kg⁻¹), cinzas (%), hidroximetilfurfural (HMF, mg kg⁻¹) e açúcares redutores (g 100 g⁻¹), permitindo uma caracterização abrangente da qualidade e da variabilidade composicional dos méis analisados.

Amostra	Ano	Abelhas-sem-ferrão	pH	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (%)	Acidez total (mEq kg ⁻¹)	Cinzas (%)	HMF (mg kg ⁻¹)	Açúcar redutor (g 100g ⁻¹)
1	2019	Guarapio	4.19	63.34	35.25	92.25	0.17	24.22	57.88
2	2019	Jataí	3.87	69.62	28.93	47.41	0.17	40.61	62.32
3	2019	Manduri	4.64	55.83	42.70	76.77	0.29	34.85	55.14
4	2019	Mandaçaia	4.45	59.09	38.91	81.83	0.28	36.40	53.03
5	2019	Manduri	3.66	62.00	36.59	75.14	0.17	36.79	54.06
6	2019	Guarapio	3.69	64.70	33.89	105.97	0.23	35.52	56.03
7	2019	Mandaçaia	3.65	64.03	34.57	91.25	0.21	30.31	54.59
8	2019	Tubuna	4.20	68.99	29.57	43.99	0.18	29.07	62.80
9	2019	Mandaçaia	3.99	73.09	25.40	67.46	0.31	62.01	61.46
10	2019	Jataí	3.70	70.71	27.82	69.67	0.07	56.78	65.68
11	2020	Mandaçaia	4.58	71.26	27.20	47.00	0.28	12.30	60.60
12	2020	Borá	3.81	72.52	25.93	43.90	0.18	11.20	53.72
13	2020	Jataí	4.09	74.02	24.47	40.07	0.23	0.00	61.30
14	2020	Mandaçaia	3.85	74.83	23.63	38.60	0.30	9.30	61.20
15	2020	Tubuna	3.70	72.60	25.87	44.30	0.04	9.70	59.70
16	2020	Tubuna	3.76	74.54	23.90	42.30	0.60	8.90	61.60
17	2020	Jataí	4.38	72.39	26.07	49.10	0.40	13.50	55.30
18	2020	Mombucão	3.32	66.92	31.40	51.20	0.60	14.80	38.30
19	2020	Jataí	4.94	72.75	25.70	42.60	0.40	11.40	58.80
20	2020	Mandaçaia	3.08	61.22	36.70	50.90	0.20	16.30	54.30
21	2020	Jataí	3.82	71.19	27.27	47.82	0.52	0.00	52.49
22	2020	Jataí	4.34	76.03	22.40	45.70	0.20	11.00	60.60
23	2020	Jataí	4.29	72.63	25.83	44.60	0.10	9.70	59.30

Amostra	Ano	Abelhas- sem-ferrão	pH	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (%)	Acidez total (mEq kg ⁻¹)	Cinzas (%)	HMF (mg kg ⁻¹)	Açúcar redutor (g 100g ⁻¹)
24	2020	Jataí	4.06	69.72	28.67	47.80	0.02	8.90	56.80
25	2020	Tubuna	3.22	70.62	27.83	49.10	0.13	15.00	58.90
26	2020	Jataí	3.67	67.76	30.47	55.05	0.52	0.00	37.43
27	2020	Jataí	3.55	76.16	22.30	48.90	0.18	8.80	58.70
28	2022	Borá	4.31	69.12	29.20	25.90	0.06	0.00	23.17
29	2022	Jataí	6.24	74.60	23.80	11.13	0.26	0.00	28.11
30	2022	Mandaçaia	3.48	62.66	35.40	42.65	0.07	0.00	27.42
31	2022	Tubuna	3.60	59.28	26.10	45.12	0.21	0.00	29.22
32	2022	Jataí	3.73	73.93	25.20	29.92	0.16	0.00	27.95
33	2022	Mandaçaia	3.50	74.96	25.20	23.59	0.03	5.02	32.83
34	2022	Jataí	3.82	74.25	24.20	31.21	0.15	0.00	30.00
35	2022	Mandaçaia	3.69	67.42	29.30	18.58	0.00	0.00	20.64
36	2022	Jataí	4.81	73.34	25.20	14.57	0.73	0.60	18.11
37	2022	Tubuna	4.04	73.53	24.80	22.08	0.19	8.54	31.40
38	2022	Borá	3.81	71.55	27.60	65.16	0.45	0.00	13.23
39	2022	Jataí	3.98	75.13	29.60	38.83	0.16	1.39	26.82
40	2023	Borá	3.65	71.56	27.00	110.84	0.90	1.88	64.90
41	2023	Jataí	3.48	71.60	25.27	102.48	0.82	0.74	60.64
42	2023	Mandaçaia	3.30	73.17	28.80	37.35	1.04	3.24	75.07
43	2023	Manduri	3.42	66.68	27.60	81.01	1.02	3.38	68.63

Tabela 2. Caracterização físico-química de amostras de mel de abelhas-sem-ferrão produzidas por diferentes espécies e coletadas em distintas regiões do estado do Paraná, Brasil, em particular região metropolitana, norte e sudeste. Os parâmetros avaliados incluíram pH, sólidos solúveis (°Brix), umidade (%), acidez total (mEq kg⁻¹), cinzas (%), hidroximetilfurfural (HMF, mg kg⁻¹) e açúcares redutores (g 100 g⁻¹), permitindo uma caracterização abrangente da qualidade e da variabilidade composicional dos méis analisados.

Amostras	Mesorregião paranaense	pH	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (%)	Acidez Total (mEq kg ⁻¹)	Cinzas (%)	HMF (mg kg ⁻¹)	Açúcares redutores (g 100 ⁻¹)
1	Metropolitana de Curitiba	3.66	62	36.59	75.14	0.17	36.79	54.06
2	Metropolitana de Curitiba	3.69	64.7	33.89	105.97	0.23	35.52	56.03
3	Metropolitana de Curitiba	3.65	64.03	34.57	91.25	0.21	30.31	54.59
4	Metropolitana de Curitiba	4.2	68.99	29.57	43.99	0.18	29.07	62.8
5	Metropolitana de Curitiba	4.31	69.12	29.2	25.9	0.06	0	23.17
6	Metropolitana de Curitiba	6.24	74.6	23.8	11.13	0.26	0	28.11
7	Metropolitana de Curitiba	3.48	62.66	35.4	42.65	0.07	0	27.42
8	Metropolitana de Curitiba	3.6	59.28	26.1	45.12	0.21	0	29.22
9	Metropolitana de Curitiba	3.5	74.96	25.2	23.59	0.03	5.02	32.83
10	Metropolitana de Curitiba	4.81	73.34	25.2	14.57	0.73	0.6	18.11
11	Metropolitana de Curitiba	4.04	73.53	24.8	22.08	0.19	8.54	31.4
12	Metropolitana de Curitiba	3.7	72.6	25.87	44.3	0.04	9.7	59.7
13	Metropolitana de Curitiba	3.76	74.54	23.9	42.3	0.6	8.9	61.6
14	Norte Central	4.19	63.34	35.25	92.25	0.17	24.22	57.88
15	Norte Central	3.87	69.62	28.93	47.41	0.17	40.61	62.32
16	Norte Central	4.64	55.83	42.7	76.77	0.29	34.85	55.14
17	Norte Central	4.45	59.09	38.91	81.83	0.28	36.4	53.03
18	Norte Central	3.99	73.09	25.4	67.46	0.31	62.01	61.46
19	Norte Central	3.7	70.71	27.82	69.67	0.07	56.78	65.68
20	Norte Central	3.82	74.25	24.2	31.21	0.15	0	30
21	Norte Central	3.81	71.55	27.6	65.16	0.45	0	13.23
22	Norte Central	3.98	75.13	29.6	38.83	0.16	1.39	26.82

Amostras	Mesorregião paranaense	pH	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (%)	Acidez Total (mEq kg⁻¹)	Cinzas (%)	HMF (mg kg⁻¹)	Açúcares redutores (g 100⁻¹)
23	Norte Central	4.58	71.26	27.2	47	0.28	12.3	60.6
24	Norte Central	3.81	72.52	25.93	43.9	0.18	11.2	53.72
25	Norte Central	4.09	74.02	24.47	40.07	0.23	0	61.3
26	Norte Central	3.08	61.22	36.7	50.9	0.2	16.3	54.3
27	Norte Central	3.82	71.19	27.27	47.82	0.52	0	52.49
28	Norte Central	3.22	70.62	27.83	49.1	0.13	15	58.9
29	Norte Central	3.67	67.76	30.47	55.05	0.52	0	37.43
30	Norte Central	3.57	72.23	26.6	105.27	0.59	0	45.91
31	Norte Central	3.5	74.31	24.15	103.2	0.63	0	42.38
32	Norte Central	3.65	71.56	27	110.84	0.9	1.88	64.9
33	Norte Central	3.48	71.6	25.27	102.48	0.82	0.74	60.64
34	Norte Central	3.3	73.17	28.8	37.35	1.04	3.24	75.07
35	Norte Central	3.42	66.68	27.6	81.01	1.02	3.38	68.63
36	Sudeste	3.69	67.42	29.3	18.58	0	0	20.64
37	Sudeste	4.38	72.39	26.07	49.1	0.4	13.5	55.3
38	Sudeste	3.32	66.92	31.4	51.2	0.6	14.8	38.3
39	Sudeste	4.94	72.75	25.7	42.6	0.4	11.4	58.8

5.3. *Análises quimiométricas*

Para avaliar a influência temporal (mês e ano de coleta) e geográfica sobre os parâmetros físico-químicos dos méis de abelhas-sem-ferrão, foi construída uma matriz de dados contendo as amostras nas linhas e os parâmetros físico-químicos nas colunas. Após a organização dos dados em planilha eletrônica do Microsoft Excel, a matriz foi exportada em formato.txt e submetida à análise no software MetaboAnalyst versão 6.0.

Inicialmente, os dados foram submetidos ao pré-processamento por auto-escalamento (autoscaling), procedimento aplicado para minimizar diferenças de magnitude entre as variáveis e permitir que todos os parâmetros contribuíssem igualmente para a análise estatística. Em seguida, foi realizada a Análise de Componentes Principais (PCA), uma técnica multivariada não supervisionada empregada para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de agrupamento, tendências e possíveis variáveis discriminantes entre as amostras.

A interpretação dos resultados foi baseada nos gráficos de escores (score plots) e de cargas (loading plots), os quais permitiram avaliar a distribuição das amostras em função dos fatores temporais e geográficos, bem como identificar os parâmetros físico-químicos com maior contribuição para a diferenciação observada entre os grupos analisados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a influência do tempo, em especial o ano em que o mel foi produzido, bem como a influência geográfica nas características físico-químicas, as informações coletadas no banco de dados do Laboratório de Análise de Alimentos foram submetidas à análise quimiométrica por PCA.

Os resultados das análises físico-químicas revelaram características importantes dos méis avaliados, destacando seu perfil ácido e o elevado teor de açúcares, principais responsáveis por suas propriedades sensoriais, especialmente a doçura (Ressutte et al., 2025b). Além disso, os parâmetros analisados evidenciaram variações entre as amostras, refletindo diferenças em sua composição físico-química. Com o objetivo de investigar a influência temporal sobre essas características, os dados foram submetidos à PCA, gerando os Score plots apresentados nas Figuras 1 e Fig. 2.

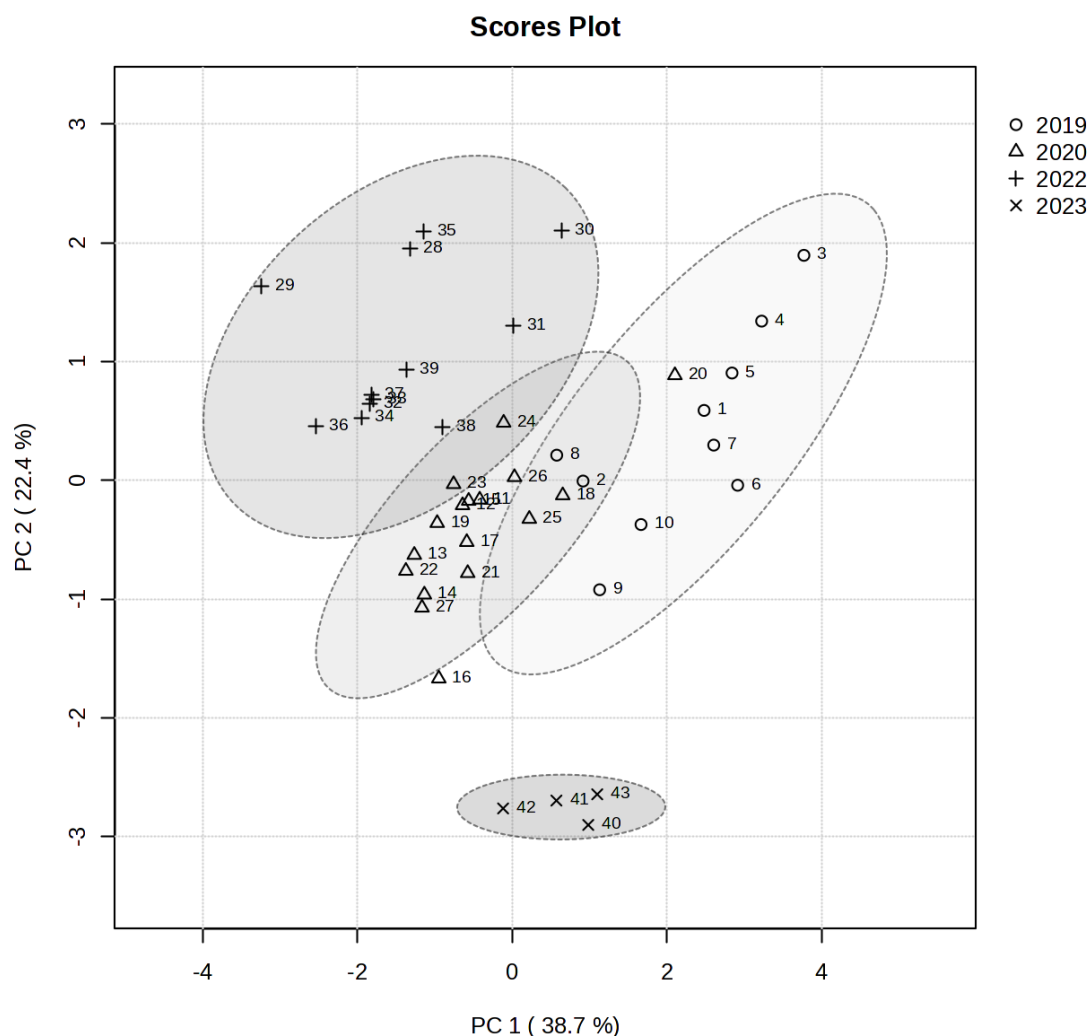
Ao comparar os perfis físico-químicos por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), observa-se, no gráfico PC1 versus PC2, a formação de agrupamentos correspondentes aos diferentes anos de coleta, considerando intervalos de confiança de 95%. Entretanto, verificam-se sobreposições entre a maioria dos grupos, com exceção das amostras de mel produzidas em 2023, que formaram um agrupamento mais distinto.

A formação de um grupo composto exclusivamente por amostras de 2023 sugere que fatores sazonais específicos desse período possam ter influenciado de maneira semelhante as características físico-químicas dos méis. Esse resultado indica que as condições ambientais predominantes naquele ano podem ter exercido maior influência sobre a composição dos méis do que as diferenças inerentes às espécies de abelhas-sem-ferrão produtoras (Jataí, Borá, Mandaçaia e Manduri).

Estudos como os de Silva, Almeida e Zeraik (2026) e Ressutte et al. (2025b) demonstram que diversos fatores podem modular o perfil químico de produtos naturais. Esses achados corroboram a hipótese apresentada neste estudo de que aspectos climáticos e sazonais podem afetar a composição do mel. Dessa forma, o agrupamento observado para as amostras de 2023 sugere que, possivelmente, condições ambientais específicas desse ano tenham contribuído para a formação de um perfil físico-químico semelhante entre amostras produzidas por diferentes espécies de abelhas-sem-ferrão. De modo semelhante, a proximidade e a sobreposição das amostras coletadas entre 2019 e 2023 no score plot apresentado na Figura 1 sugerem que as condições predominantes nesses anos também possam ter contribuído para a obtenção de perfis físico-químicos semelhantes entre os méis

avaliados.

Figura 1. Score plot PC1 x PC2 (PCA) das 43 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.



Para avaliar a influência dos parâmetros físico-químicos na distribuição das amostras ao longo das componentes principais PC1, PC2 e PC3 (Figuras 1 e 2), foram analisados os valores de loading apresentados na Tabela 3. Os loadings permitem identificar a contribuição de cada variável para a formação dos agrupamentos observados no score plot. De modo geral, variáveis com valores negativos de loading estão associadas às amostras posicionadas na região negativa da componente principal, enquanto variáveis com valores positivos contribuem para a distribuição das amostras na região positiva.

A análise dos loadings revelou que três parâmetros físico-químicos exerceram maior influência sobre o agrupamento das amostras de mel produzidas em 2023: umidade, acidez total e teor de cinzas.

Dentre essas variáveis, a acidez total apresentou a maior contribuição para a separação das amostras, seguida pela umidade e pelo teor de cinzas. Em termos de qualidade, o maior teor de acidez pode estar associado a uma percepção sensorial mais ácida, enquanto a elevada umidade pode favorecer processos fermentativos e o desenvolvimento microbológico. Adicionalmente, o maior teor de cinzas sugere uma concentração mais elevada de minerais, característica frequentemente relacionada ao potencial funcional e ao valor nutricional do mel (Ressutte et al., 2025^a, 2025^b; Zheng et al., 2025). No entanto, para confirmar a influência dessas alterações físico-químicas sobre os atributos organolépticos e a aceitação do produto, são necessários estudos complementares envolvendo análises sensoriais e testes de percepção do consumidor.

Tabela 3. Valores de loading das componentes principais PC1, PC2 e PC3 obtidos pela PCA, indicando a contribuição dos parâmetros físico-químicos (pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores) para a discriminação de amostras de mel de abelhas-sem-ferrão produzidas em diferentes anos.

Parâmetros	PC1	PC2	PC3
pH	-0.0048655	0.0061631	-0.0063387
Sólidos solúveis (°Brix)	-0.079651	0.088409	0.17862
Umidade (%)	0.076694	-0.055731	-0.17607
Acidez total (mEq kg ⁻¹)	0.82769	-0.54069	0.020683
Cinzas (%)	0.0021567	-0.0048607	0.0099524
HMF (mg Kg ⁻¹)	0.37815	0.59608	-0.68957
Açúcar redutor (g 100g ⁻¹)	0.39959	0.58426	0.67899

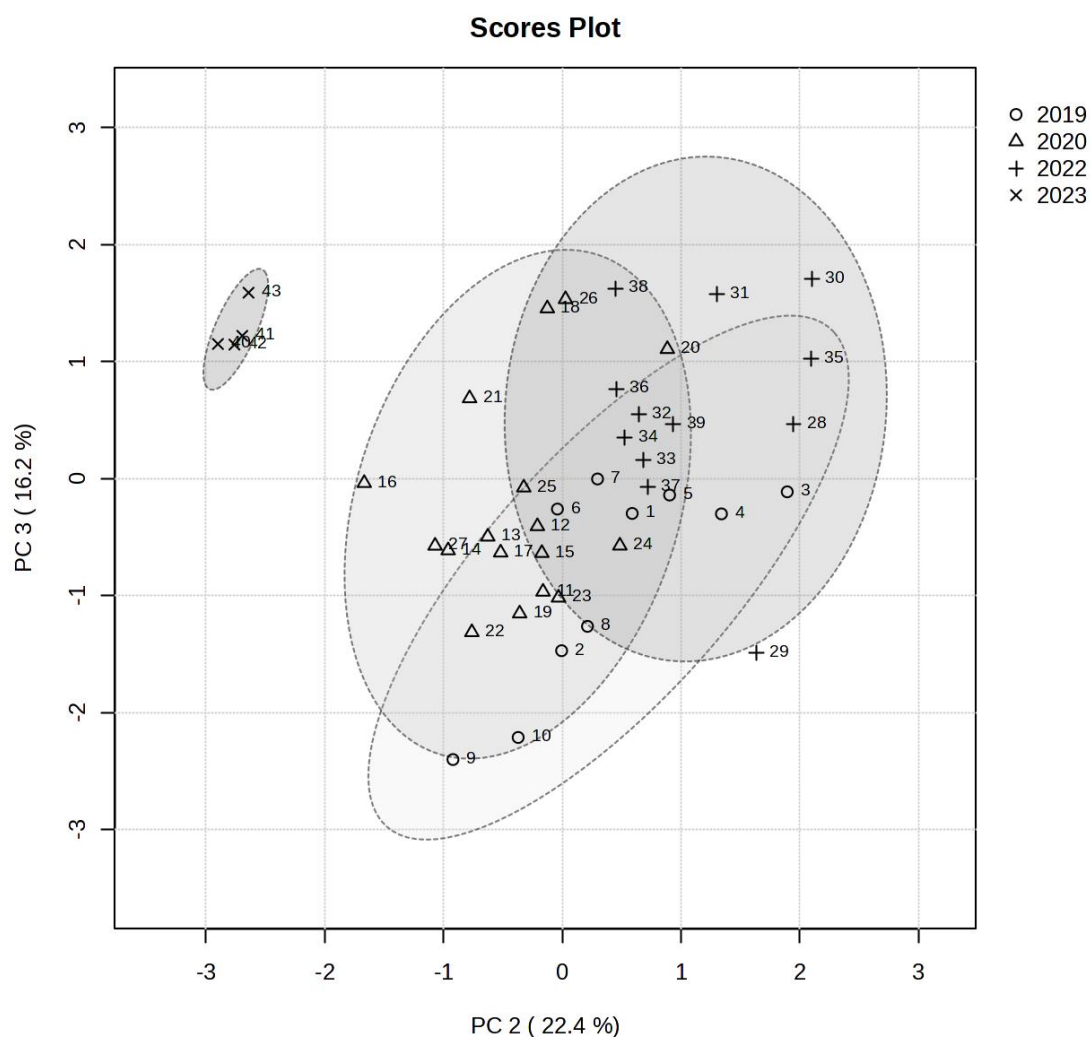
Destaca-se que os valores positivos da PC2 estiveram mais associados às amostras produzidas entre 2019 e 2023. No entanto, devido à elevada sobreposição observada entre os grupos correspondentes a esses anos, não foi possível identificar com maior precisão como o fator temporal influenciou os perfis físico-químicos dos méis ao longo desse período. Essa proximidade entre as amostras sugere a existência de características composicionais semelhantes entre os diferentes anos avaliados.

Dessa forma, estudos complementares são necessários para aprofundar a compreensão dos efeitos temporais sobre a composição do mel. Em especial, abordagens baseadas em análises moleculares, metabolômicas e cromatográficas poderão fornecer

informações mais detalhadas sobre a influência de fatores sazonais e ambientais na biossíntese de compostos e na composição química dos méis produzidos em diferentes anos.

Com o objetivo de maximizar a visualização das diferenças entre as amostras em função do ano de produção, foram avaliadas as componentes principais PC2 e PC3 (Figura 2). Conforme observado na Figura 2, a projeção dessas componentes reforça os resultados obtidos anteriormente, evidenciando que apenas as amostras produzidas em 2023 formaram um agrupamento exclusivo, composto unicamente por méis coletados nesse ano. Portanto, tais resultados confirmam a necessidade de estudos adicionais para avaliar o aspecto temporal entre anos.

Figura 2. Score plot PC2 x PC3 (PCA) das 43 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.



Considerando que estudos como Zheng et al. (2025), Silva, Almeida e Zeraik (2026) e Ressutte et al. (2025a, 2025b) destacam a influência da origem geográfica sobre a composição de produtos naturais, os parâmetros físico-químicos dos méis foram compilados em matrizes de dados e submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA), cujos resultados são apresentados nas Figuras 3 e 4.

Os scores plots obtidos para as combinações $PC1 \times PC2$ e $PC2 \times PC3$ não evidenciaram uma discriminação clara das amostras em função da localidade de coleta. A ausência de agrupamentos bem definidos sugere que, em nível físico-químico, os méis provenientes de diferentes regiões não apresentam perfis suficientemente distintos para serem discriminados com base nos parâmetros avaliados neste estudo.

Uma possível explicação para esse comportamento é que os parâmetros físico-químicos clássicos, como pH, umidade, sólidos solúveis, acidez, cinzas, HMF e açúcares redutores, podem ser mais influenciados por fatores relacionados à espécie produtora, às condições climáticas anuais e ao estágio de maturação do mel do que propriamente pela localização geográfica. Além disso, a elevada variabilidade natural observada em méis de abelhas-sem-ferrão pode mascarar possíveis diferenças regionais. Dessa forma, análises mais abrangentes, incluindo abordagens metabolômicas e a caracterização de compostos minoritários, podem ser necessárias para identificar marcadores químicos capazes de discriminar amostras de diferentes origens geográficas.

Figura 3. Score plot PC1 x PC2 (PCA) das 39 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão coletadas em diferentes regiões paranaenses (metropolitana, norte e sudeste) com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.

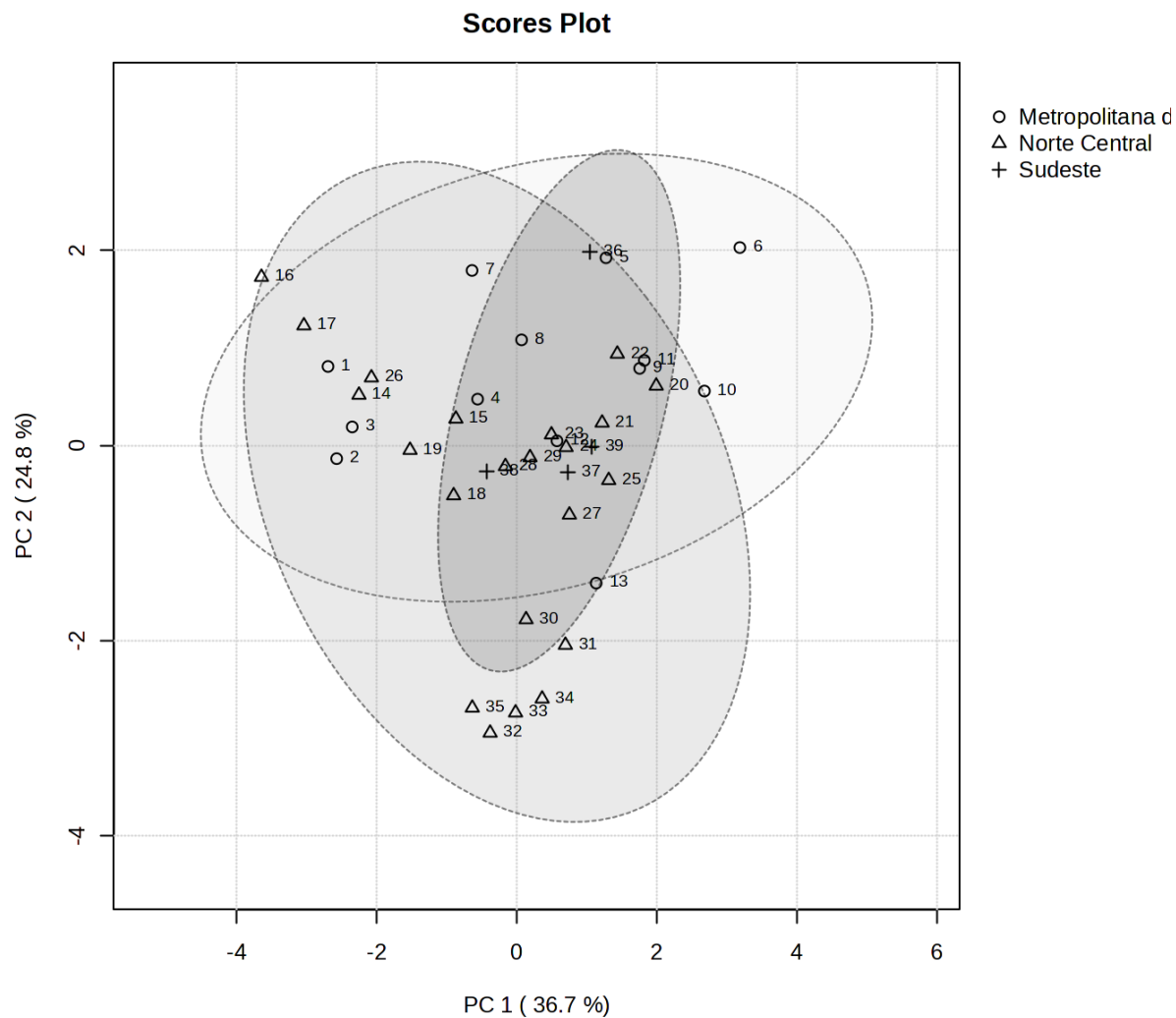
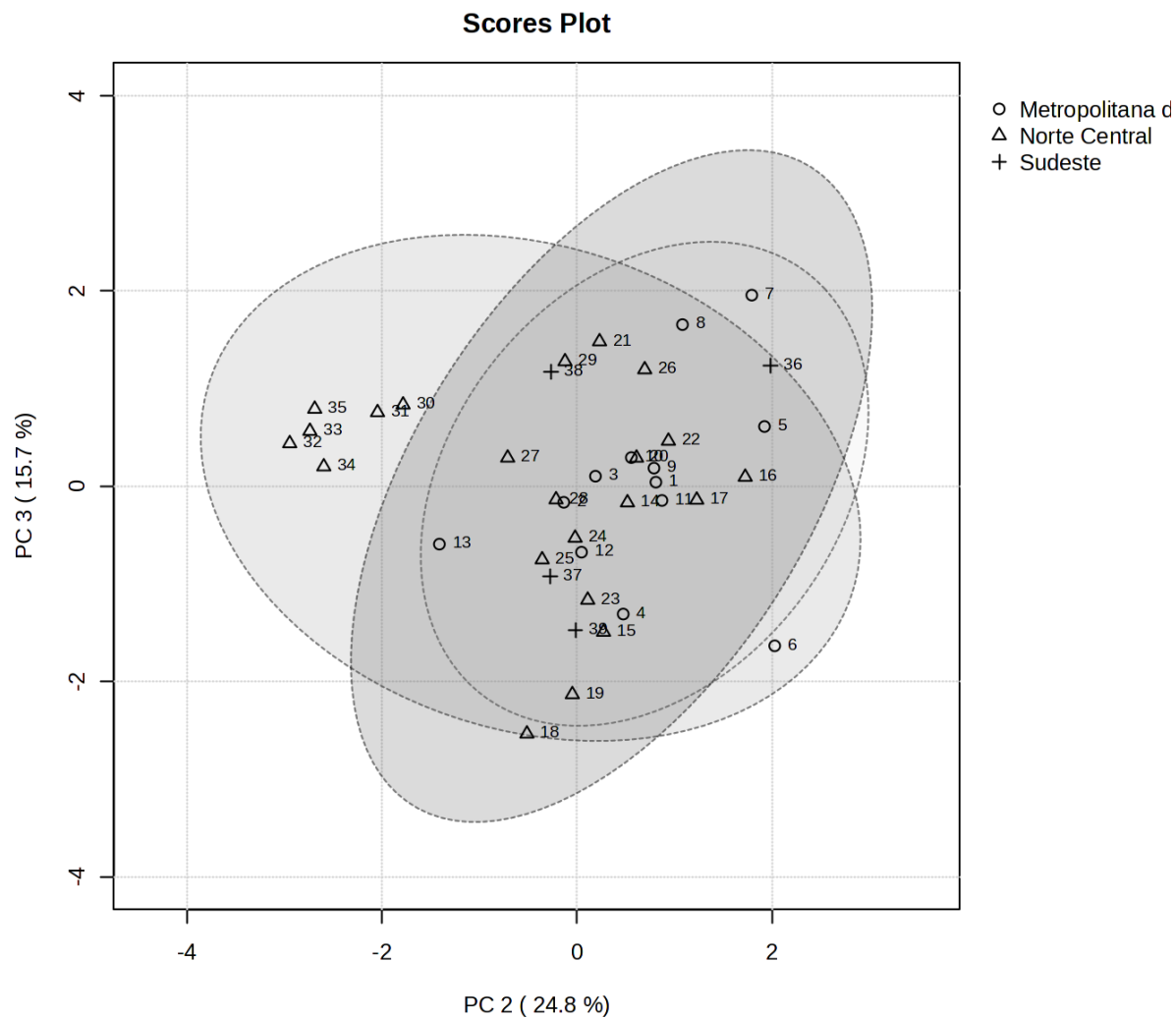


Figura 4. Score plot PC2 x PC3 (PCA) das 39 amostras de mel de abelhas-sem-ferrão coletadas em diferentes regiões paranaenses (metropolitana, norte e sudeste) com base nos parâmetros físico-químicos pH, sólidos solúveis, umidade, acidez total, cinzas, HMF e açúcares redutores.



7. CONCLUSÃO

A avaliação de 43 amostras de méis de abelhas-sem-ferrão produzidas entre 2019 e 2023 demonstrou que o fator temporal pode influenciar o perfil físico-químico desses produtos. As análises quimiométricas revelaram que apenas as amostras produzidas em 2023 formaram um agrupamento exclusivo, distinto dos demais anos avaliados, sugerindo que condições ambientais e climáticas específicas desse período exerceram influência significativa sobre a composição dos méis. Por outro lado, as amostras produzidas entre 2019 e 2022 apresentaram elevada sobreposição nos scores plots, indicando perfis físico-químicos semelhantes e evidenciando que a influência temporal não ocorre de maneira uniforme ao longo dos anos.

A interpretação dos valores de loading indicou que parâmetros como acidez total, umidade e teor de cinzas contribuíram de forma relevante para a diferenciação das amostras de 2023. Esses resultados sugerem que variações climáticas sazonais podem impactar características relacionadas à estabilidade, composição mineral e propriedades sensoriais dos méis. Entretanto, estudos complementares envolvendo análises microbiológicas, sensoriais e funcionais são necessários para confirmar os possíveis efeitos dessas diferenças físico-químicas sobre a qualidade e as características organolépticas do produto.

Em relação ao fator geográfico, não foi observada discriminação consistente das amostras em função da localidade de coleta. Os resultados obtidos por PCA indicaram elevada sobreposição entre os grupos geográficos avaliados, sugerindo que os parâmetros físico-químicos clássicos empregados neste estudo não foram suficientes para caracterizar perfis regionais específicos. Esse comportamento pode estar relacionado à elevada variabilidade natural dos méis de abelhas-sem-ferrão e à influência simultânea de múltiplos fatores, incluindo espécie produtora, condições climáticas, disponibilidade floral e estágio de maturação do mel.

Como principal contribuição científica, este estudo fornece uma avaliação abrangente da influência temporal e geográfica sobre o perfil físico-químico de méis de abelhas-sem-ferrão produzidos no estado do Paraná. Os resultados ampliam o conhecimento sobre a variabilidade desses produtos e reforça a importância do monitoramento contínuo de parâmetros de qualidade, especialmente diante da ausência de legislação específica para méis de abelhas-sem-ferrão. Além disso, os dados gerados podem subsidiar futuras propostas de regulamentação, certificação de qualidade e valorização comercial desses méis.

Entre as limitações do estudo, destaca-se a utilização exclusiva de parâmetros físico-químicos convencionais, os quais podem não refletir toda a complexidade química desses produtos. Dessa forma, diferenças relacionadas à origem geográfica ou temporal podem não ter sido completamente capturadas pelas variáveis avaliadas.

Como perspectivas futuras recomendam-se a integração de abordagens metabolômicas, cromatográficas e espectrométricas de alta resolução para investigar a influência do tempo e da localização geográfica sobre compostos bioativos e metabólitos minoritários presentes nos méis. Adicionalmente, estudos que incorporem dados climáticos, perfil botânico das áreas de forrageamento, análises sensoriais, propriedades biológicas e técnicas avançadas de aprendizado de máquina poderão contribuir para a identificação de marcadores químicos associados à origem, qualidade e autenticidade dos méis de abelhas-sem-ferrão. Essas abordagens permitirão uma compreensão mais abrangente dos fatores que modulam a composição desses produtos, fortalecendo seu potencial científico, tecnológico e comercial.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, Gerso P. *et al.* Dereplication by HPLC-ESI-MS and antioxidant activity of phenolic compounds from *Banisteriopsis laevifolia* (Malpighiaceae). **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, v. 94, n. 1, 2022.
- ALVES, Virgínia F. *et al.* Associated bacterial microbiota of honey and related products from stingless bees as novel sources of bioactive compounds for biotechnological applications. **Current Opinion in Food Science**, v. 55, p. 101122, fev. 2024.
- BILUCA, Fabíola C. *et al.* 5-HMF and carbohydrates content in stingless bee honey by CE before and after thermal treatment. **Food Chemistry**, v. 159, p. 244–249, set. 2014.
- DA SILVA, Isnandia Andréa Almeida *et al.* Phenolic profile, antioxidant activity and palynological analysis of stingless bee honey from Amazonas, Northern Brazil. **Food Chemistry**, v. 141, n. 4, p. 3552–3558, dez. 2013.
- DEXTER, Kyle G. *et al.* Inserting Tropical Dry Forests Into the Discussion on Biome Transitions in the Tropics. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 6, 24 jul. 2018.
- ENGEL, Michael S. *et al.* Stingless bee classification and biology (Hymenoptera, Apidae): a review, with an updated key to genera and subgenera. **ZooKeys**, v. 1172, p. 239–312, 27 jul. 2023.
- FERREIRA, Márcia Miguel Castro. **Quimiometria: Conceitos, Métodos e Aplicações**. 1. ed. [S.l.: S.n.].
- GEORGE W. LATIMER JR. **Association of Official Analytical Chemists (2016) Official**. 20. ed. [S.l.: S.n.].
- GRANDO, Remili Cristiani *et al.* Physicochemical characterization and acceptance of honey from stingless bees. **Food and Humanity**, v. 1, p. 71–77, dez. 2023.
- MANNOCHIO-RUSSO, Helena *et al.* Old Meets New: Mass Spectrometry-Based Untargeted Metabolomics Reveals Unusual Larvicidal Nitropropanoyl Glycosides from the Leaves of *Heteropterys umbellata*. **Journal of Natural Products**, v. 86, n. 3, p. 621–632, 24 mar. 2023.
- MDUDA, Christopher Alphonse *et al.* Stingless bee honey in East Africa: Sustainability, chemical composition and quality compliance. **Food and Humanity**, v. 5, p. 100733, dez. 2025.
- PANDHI, Shikha; KUMAR, Arvind. Assessing the influence of extraction techniques on the phytochemical composition of green coffee (*Coffea arabica*) using principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA). **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 102, n. 11, p. 102111, nov. 2025.
- PHONMAT, Salinee *et al.* Comparative analysis of microbiological, physicochemical, antioxidant and antibacterial properties of stingless bee (*Tetragonula pagdeni* Schwarz) honey from various agricultural areas in Eastern Thailand. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p.

101183, dez. 2025a.

PHONMAT, Salinee *et al.* Comparative analysis of microbiological, physicochemical, antioxidant and antibacterial properties of stingless bee (*Tetragonula pagdeni* Schwarz) honey from various agricultural areas in Eastern Thailand. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p. 101183, dez. 2025b.

RAYPAH, Muna E. *et al.* Near-infrared spectroscopy with chemometrics for identification and quantification of adulteration in high-quality stingless bee honey. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 224, p. 104540, maio 2022.

RESSUTTE, Jéssica *et al.* Sugar detection and quantification in honey bee and stingless bee honey—A review. **Journal of Apicultural Research**, p. 1–27, 13 nov. 2025a.

RESSUTTE, Jéssica B. *et al.* Advanced classification of Brazilian stingless bee honey by genus using comprehensive analytical techniques and chemometrics. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 139, p. 107138, mar. 2025b.

SHARIN, Siti Nurhidayah *et al.* Impact of harvesting seasons on physicochemical properties and volatile compound profiles of Malaysian stingless bee honey analysed using chemometrics and support vector machine. **Food Chemistry**, v. 444, p. 138429, jun. 2024.

SILVA, Jaqueline Munise Guimarães da *et al.* UHPLC-QTOF-MS/MS Metabolomic Profiling Reveals Environmental, Morphological, and Taxonomic Drivers of Chemical Diversity in Neotropical *Banisteriopsis* and *Stigmaphyllon*. **Separations**, v. 12, n. 11, p. 323, 20 nov. 2025.

SILVA, Jaqueline Munise Guimarães da; ALMEIDA, Rafael Felipe de; ZERAIK, Maria Luiza. Multivariate Analysis of UPLC-MS/MS Metabolomic Profiles in Four *Hiraea* Species (Malpighiaceae). **Separations**, v. 12, n. 6, p. 159, 11 jun. 2025.

SILVA, Jaqueline Munise Guimarães da; DE ALMEIDA, Rafael Felipe; ZERAIK, Maria Luiza. Metabolomic Differentiation of Malpighiaceae From Dry and Humid Tropics via UHPLC-MS/MS and Chemometrics. **Analytical Science Advances**, v. 7, n. 1, 6 jun. 2026.

ZALDIVAR-ORTEGA, A. *et al.* 150. Comparison of chemical composition and antioxidant activity of honey from *Apis mellifera* and stingless bees: an analytical review and meta-analysis. **Animal - Science proceedings**, v. 15, n. 1, p. 167–168, mar. 2024.

ZHANG, Jiali *et al.* Variations in the sugar profiles of Brazilian stingless bee honeys as determined by ion chromatography: A preliminary study of the effect of bee species and botanical source. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 148, p. 108187, dez. 2025.

ZHENG, Rui *et al.* Variable importance for projection (VIP) scores for analyzing the contribution of risk factors in severe adverse events to Xiyanping injection. **Chinese Medicine (United Kingdom)**, v. 18, n. 1, 1 dez. 2023.

ZHENG, Xing *et al.* A focus on the Chinese stingless bee honey (Hymenoptera, Apidae, Meliponini): Exploring physicochemical parameters for establishing quality standards. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 137, p. 106823, jan. 2025.