



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

OTÁVIO PEREIRA CAMARA

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E SENSORIAL DA ERVA-MATE (*Ilex
paraguariensis*) DURANTE A MATURAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE ANÁLISES
COLORIMÉTRICAS E DINÂMICA FENÓLICA**

FRANCISCO BELTRÃO
2026

OTÁVIO PEREIRA CAMARA

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E SENSORIAL DA ERVA-MATE (*Ilex
paraguariensis*) DURANTE A MATURAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE ANÁLISES
COLORIMÉTRICAS E DINÂMICA FENÓLICA**

**TECHNOLOGICAL AND SENSORY EVALUATION OF YERBA MATE (*Ilex
paraguariensis*) DURING MATURATION: INTEGRATION OF COLORIMETRIC
ANALYSES AND PHENOLIC DYNAMICS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Alimentos.

Área de Concentração: Tecnologia de Alimentos

Orientadora: Prof. Dr. Luciano Luchetta

Coorientadora: Profa. Marina Leite Mitterer Daltoe

FRANCISCO BELTRÃO

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina



OTAVIO PEREIRA CAMARA

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA E SENSORIAL DA ERVA-MATE (ILEX
PARAGUARIENSIS) DURANTE A MATURAÇÃO: INTEGRAÇÃO DE ANÁLISES
COLORIMÉTRICAS E DINÂMICA FENÓLICA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Tecnologia De Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Tecnologia De Alimentos.

Data de aprovação: 03 de Março de 2026

Dr. Luciano Lucchetta, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Milene Oliveira Pereira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal

do Paraná Dr. Thiago Caio Celante Gomes, Doutorado - Yerba Madre

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 03/03/2026.

RESUMO

A cor constitui um atributo sensorial determinante no mercado de produtos à base de plantas, sendo a intensidade do tom esverdeado o principal parâmetro de frescor da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) valorizado pelos consumidores. Durante a industrialização e o período de maturação (descanso), o uso de instrumentos objetivos para avaliação da cor é essencial para reduzir a subjetividade dos métodos empíricos. Este estudo teve como objetivos validar a aplicabilidade do colorímetro portátil Nix Quality Control (Nix QC) em comparação ao padrão industrial Konica Minolta CR-410 e avaliar as transformações físico-químicas, fenólicas e sensoriais da erva-mate ao longo de 12 meses de maturação natural. No primeiro capítulo, foram analisados os parâmetros do espaço de cor CIELAB em 219 lotes, demonstrando alta correlação entre os dispositivos para os parâmetros a^* ($r = 0,931$) e b^* , validando o Nix QC como alternativa técnica viável. No segundo capítulo, amostras de erva-mate nativa foram monitoradas quanto à umidade, atividade de água, dinâmica de compostos fenólicos (via HPLC) e perfil sensorial (via ADQ). Os resultados indicaram aumento significativo na umidade (2,86% para 8,06%) e redução progressiva nos teores de cafeína, teobromina e fenólicos livres devido a reações oxidativas e polimerização. A análise sensorial revelou uma transição nítida do perfil "verde-fresco" para um perfil "maduro", caracterizado por coloração dourada, notas de palha e maior adstringência. A Análise de Componentes Principais (PCA) confirmou a distinção das amostras nos estágios finais de maturação (9 e 12 meses). Conclui-se que a maturação controlada modula estrategicamente a qualidade da erva-mate, agregando complexidade sensorial e estabilidade, sendo o monitoramento instrumental uma ferramenta fundamental para a padronização industrial e segmentação de mercados premium.

Palavras-chave: Erva-Mate. Maturação. Colorimetria. Compostos Fenólicos. Análise Sensorial. Controle de Qualidade.

ABSTRACT

Color is a determining sensory attribute in the plant-based product market, with the intensity of the green hue being the primary freshness parameter of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) valued by consumers. During industrialization and the maturation period (resting), the use of objective instruments for color assessment is essential to reduce the subjectivity of empirical methods. This study aimed to validate the applicability of the Nix Quality Control (Nix QC) portable colorimeter in comparison to the industrial standard Konica Minolta CR-410, and to evaluate the physicochemical, phenolic, and sensory transformations of yerba mate over 12 months of natural maturation. In the first chapter, CIELAB color space parameters were analyzed across 219 batches, demonstrating high correlation between devices for the a^* ($r = 0.931$) and b^* parameters, validating the Nix QC as a technically viable alternative. In the second chapter, native yerba mate samples were monitored for moisture content, water activity, phenolic compound dynamics (via HPLC), and sensory profile (via Descriptive Analysis — DA). Results indicated a significant increase in moisture content (2.86% to 8.06%) and a progressive reduction in caffeine, theobromine, and free phenolic levels, attributed to oxidative reactions and polymerization. Sensory analysis revealed a clear transition from a "fresh-green" profile to a "mature" profile, characterized by golden coloration, straw-like notes, and increased astringency. Principal Component Analysis (PCA) confirmed the discrimination of samples at the final maturation stages (9 and 12 months). It is concluded that controlled maturation strategically modulates yerba mate quality, adding sensory complexity and stability, with instrumental monitoring serving as a fundamental tool for industrial standardization and premium market segmentation.

Keywords: Yerba Mate. Maturation. Colorimetry. Phenolic Compounds. Sensory Analysis. Quality Control.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	OBJETIVOS	6
2.1	Objetivo Geral	6
2.2	Objetivos Específicos	6
3	REFERENCIAL TEÓRICO	7
3.1	Processamento Agroindustrial da erva-mate.....	7
3.2	Composição Química da erva-mate	9
4	DISCUSSÃO INTEGRATIVA DOS RESULTADOS	10
4.1	Artigo 1 - Colorímetro NIX para avaliação de cor de erva-mate	10
4.2	Artigo 2 - Caracterização tecnológica e sensorial da erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>) ao longo de 12 meses de maturação: relacionando a dinâmica fenólica à evolução da qualidade	12
5	PERSPECTIVAS FUTURAS	14
	REFERÊNCIAS.....	16

1 INTRODUÇÃO

A *Ilex paraguariensis* St. Hil., popularmente conhecida como erva-mate, é uma espécie nativa da região subtropical da América do Sul, com expressiva importância econômica, cultural e social, especialmente no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai (CARDOZO JUNIOR et al., 2010; GONÇALVES et al., 2015a). Além de seu valor tradicional, a erva-mate destaca-se pelo elevado teor de compostos bioativos, como metilxantinas (cafeína e teobromina), ácidos fenólicos (clorogênico e cafeico) e flavonoides (catequina e rutina), os quais conferem propriedades antioxidantes, estimulantes e anti-inflamatórias ao produto (BLUM-SILVA et al., 2015; HOLOWATY et al., 2016; RZAŞA-DURAN et al., 2024).

A composição química e o perfil sensorial da erva-mate são influenciados por fatores edafoclimáticos, época de colheita e condições de processamento industrial (NAJMAN et al., 2024; ZAIONS et al., 2014). Durante o processamento, etapas como sapeco, secagem e moagem têm como objetivo inativar enzimas oxidativas e garantir estabilidade do produto, podendo, entretanto, promover alterações estruturais em compostos fenólicos e pigmentos naturais (HOLOWATY et al., 2014, 2016; ISOLABELLA et al., 2010).

Após o processamento, a etapa de maturação ou descanso constitui um ponto crítico para a qualidade final da erva-mate. Esse período, que pode se estender por até 12 meses, envolve reações oxidativas, polimerização de compostos fenólicos e degradação de clorofilas, resultando em modificações perceptíveis na cor, aroma e sabor (GONÇALVES; VALDUGA, 2023; VALDUGA et al., 2019). A degradação da clorofila, especialmente por processos como feofitinação e oxidação, promove a transição da coloração verde intensa para tonalidades verde-oliva ou amareladas, fenômeno diretamente associado às condições de armazenamento, como temperatura, umidade e exposição à luz (CABRAL-MALHEIROS et al., 2010; HOLOWATY et al., 2014; LEWINSKI et al., 2015).

Do ponto de vista sensorial, a maturação conduz à redução de notas herbáceas e ao desenvolvimento de atributos mais complexos, como amargor e adstringência mais pronunciados, associados à formação de compostos voláteis, incluindo furfural e pirazinas (BLUM-SILVA et al., 2015; MÁRQUEZ et al., 2013). Paralelamente, estudos indicam redução gradual nos teores de compostos fenólicos livres e alterações na capacidade antioxidante, decorrentes da formação de estruturas poliméricas mais estáveis (HOLOWATY et al., 2016; NAJMAN et al., 2024).

Considerando que a cor é um dos principais atributos valorizados pelos consumidores, especialmente no mercado brasileiro, sua mensuração objetiva torna-se fundamental para a

padronização da qualidade (RZAŞA-DURAN et al., 2022; SARREAL, 2023). A análise instrumental no sistema CIELAB, por meio dos parâmetros L^* , a^* e b^* , é amplamente empregada na avaliação da qualidade cromática da erva-mate (LEWINSKI et al., 2015; VALDUGA et al., 2016). Equipamentos como o colorímetro Konica Minolta CR-410 têm sido utilizados para essa finalidade; contudo, seu elevado custo pode limitar a adoção por pequenas e médias empresas do setor (CROGE et al., 2021; HOLOWATY et al., 2014).

Nesse contexto, dispositivos portáteis como o Nix Color Sensor Quality Control (Nix QC) surgem como alternativas de menor custo, capazes de fornecer leituras dos parâmetros L^* , a^* e b^* por meio de integração com aplicativos móveis (HOLMAN et al., 2018; SCHELKOPF et al., 2021; SWETHA et al., 2022). Entretanto, ainda são escassos os estudos que avaliem comparativamente a precisão desses equipamentos na análise da cor da erva-mate, bem como que integrem de forma multivariada parâmetros físico-químicos, fenólicos e sensoriais ao longo do processo de maturação.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar as modificações nos parâmetros físico-químicos, na composição fenólica e nos atributos sensoriais da erva-mate ao longo de 12 meses de maturação natural, bem como investigar a aplicabilidade de diferentes dispositivos de medição instrumental da cor na padronização da qualidade do produto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar as transformações tecnológicas, químicas e sensoriais da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) ao longo de 12 meses de maturação, estabelecendo relações entre parâmetros colorimétricos, dinâmica de compostos fenólicos e atributos sensoriais, bem como validar a aplicabilidade de dispositivos instrumentais alternativos para o monitoramento da qualidade do produto.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as alterações nos parâmetros físico-químicos (umidade e atividade de água) da erva-mate durante o período de maturação.
- Quantificar os principais compostos fenólicos e metilxantinas (ácido clorogênico, ácido cafeico, catequina, cafeína e teobromina) ao longo do armazenamento por meio de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE).
- Avaliar as modificações nos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , D^* , YI e ΔE) durante o processo de maturação.
- Comparar o desempenho do colorímetro portátil Nix Quality Control com o colorímetro Konica Minolta CR-410, por meio de análises de correlação e regressão, para validação como ferramenta alternativa de monitoramento da cor.
- Caracterizar o perfil sensorial da erva-mate maturada por meio de Análise Descritiva Quantitativa (ADQ), identificando a evolução dos atributos ao longo do tempo.
- Investigar, por meio de análise multivariada (PCA), as correlações entre parâmetros físico-químicos, compostos fenólicos, índices colorimétricos e atributos sensoriais.
- Estabelecer marcadores tecnológicos e químicos associados aos diferentes estágios de maturação da erva-mate.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Processamento Agroindustrial da erva-mate

Há dois sistemas de produção distintos para erva-mate, os ervais nativos, que representam a maior parte da produção do Brasil (MACCARI; SANTOS, 2000) e os ervais plantados, estes que possuem diversas variações de tipos de plantio (MENDES, 2005). A exploração deste produto vegetal baseia-se na captação de folhas e ramos, que geram diversos produtos, as principais nomeações diferem-se conforme a localidade onde a erva-mate está sendo comercializada, no sul do Brasil chama-se “chimarrão”, na Argentina “mate” e no Paraguai “Tererê” (BRACESCO et al., 2010).

O sistema de produção agroindustrial da erva-mate verde pode ser dividido em duas etapas, estas que influenciam diretamente na composição química e sensorial do produto (ISOLABELLA et al., 2010; VALERGA et al., 2012). A primeira etapa chama-se cancheamento, no qual inicialmente a matéria prima é colhida e podada em campo, para que na indústria seja recebido apenas os ramos devidamente classificados e as folhas, que seguem para o processo de sapeco que configura-se como um processo de branqueamento, que tem como objetivo principal a inativação das enzimas polifenoloxidase e peroxidase, que são responsáveis pelo escurecimento enzimático, paralisando assim possíveis alterações não conformes de coloração, sabor e aroma na erva-mate (MAZUCHOWSKI, 1991; ESMELINDRO et al., 2002; CABRAL-MALHEIROS, 2007).

Atualmente na indústria utiliza-se um cilindro metálico giratório, chamado de “sapecador mecânico” a temperatura média de entrada dos ramos e folhas é de 400 °C, é neste equipamento que se retira a umidade superficial das folhas, para assim, no final da operação, encontrarmos um teor médio de umidade em torno de 16% (VALDUGA, 1995; MAZUCHOWSKI, 1991; PERALTA; SCHMALKO, 2007). Após o sapeco o processo segue para a secagem, que tem como objetivo a diminuição da umidade, pois o excesso pode gerar o desenvolvimento da deterioração microbiológica e o avanço de reações enzimáticas não desejadas. Este tratamento fixa o aroma e o sabor da erva-mate, gerando as características esperadas pelo consumidor (PARANÁ, 2000).

Há dois tipos de secadores mecânicos utilizados na indústria, o rotativo que possui contato direto com a fumaça e com secagem média de 30 minutos, com temperaturas que variam de 110 a 350 °C e o secador por esteiras, que não há contato direto com a fumaça e sua secagem média é de 3 horas, com temperatura uniforme de 90 a 110 °C (ESMELINDRO et al., 2002).

Após a finalização da secagem o produto segue para o cancheamento, que é quando a material vegetal em questão é fragmentada em equipamentos chamados cancheadores, que nada mais são que trituradores onde o produto é alocado para trituração “grosseira”, gerando assim a “erva-mate cancheada” (ESMELINDRO et al., 2002; PARANÁ, 2000). Conforme a erva-mate é “cancheada” ela segue para o armazenamento que em definição é similar ao estacionamento, porém, o objetivo principal deste processo é a maturação/oxidação da erva-mate, que desenvolve características de cor e sabor diferenciadas, conforme o tempo de estocagem, este tempo de armazenamento é definido conforme o mercado no qual o produto é direcionado (MACCARI, 2005).

A segunda etapa da produção é a do beneficiamento que nada mais é que a etapa de moagem final, onde busca-se a classificação do tamanho das folhas e talos, a partir do processo de peneiragem e moagem, para que assim a granulometria e as porcentagens finais de folhas, pó e talos, atendam a especificação desejada (VALDUGA, 1995; MAZUCHOWSKI, 1991; PARANÁ, 2000).

Figura 1 - Fluxograma do processo produtivo da erva-mate com estacionamento natural



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT, OpenAI, 2026).

3.2 Composição Química da erva-mate

A composição química da erva-mate é variada, apresentando sais minerais, vitaminas, aminoácidos, saponinas, alcaloides (metilxantinas como cafeína, teobromina e teofilina), açúcares e compostos fenólicos, componentes que podem ser considerados para avaliações da qualidade da erva-mate (NEWALL et al., 1996).

Existe três classes majoritárias de compostos vegetais secundários, os alcaloides (inclui-se as metilxantinas), os terpenos (como os óleos essenciais) e os compostos fenólicos (taninos, flavonoides e ácidos fenólicos) (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2001). Considera-se que as metilxantinas e os compostos fenólicos, como o ácido clorogênico e o ácido cafeico, são agentes conhecidos que atuam em características biológicas na erva-mate (BASTOS; TORRES, 2003). Considerando a composição química da erva-mate, sabe-se que esta possui diversas aplicações por conta de suas ações antioxidantes, anti-inflamatórias e antimutagênicas, entre outras. Atualmente, a erva-mate continua sendo objeto de diversos estudos de fronteira que buscam compreender sua estabilidade gastrointestinal e potencial terapêutico em doenças crônicas (CÂNDIDO; ROCHA, 2025; PALAVICINI et al., 2025; CASSOTTA et al., 2025).

Um componente muito importante existente na erva-mate é a clorofila, que por definição é a designação de um grupo de pigmentos fotossintéticos naturais presente nas plantas e em outros tecidos vegetais e está presente em todos os organismos que realizam fotossíntese oxigênica (SCHWARTZ; ELBE, 1983). Nas plantas superiores a clorofila possui duas formas de apresentação a clorofila *a* e *b*, em uma proporção de 3:1, ambas são verdes, porém, seus espectros de absorção são ligeiramente diferentes, resultando que para o olho humano a clorofila *a* apresenta uma tonalidade verde azulada, e a clorofila *b*, verde amarelada (STEET; TONG, 1996). Na erva-mate a coloração verde tem relação direta com a concentração de clorofila e a sua degradação pode ser alterada conforme o processamento (RUBÉN et al., 1999).

4 DISCUSSÃO INTEGRATIVA DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os principais resultados obtidos ao longo do projeto de pesquisa, estabelecendo conexões entre os diferentes estudos que compõem esta coletânea de dois artigos. Por meio de uma abordagem integrativa, os resultados são contextualizados, analisados e apresentados, permitindo uma compreensão dos experimentos realizados. Os dois artigos demonstram a contribuição científica profunda na temática de erva mate. O artigo 1 já está publicado e aborda a importância da Utilização de colorímetro no acompanhamento dos parâmetros de coloração de erva mate em diferentes etapas de maturação. O artigo 2 está em fase de submissão a periódico de alto impacto e aborda características de qualidade ao longo de 12 meses de maturação de erva mate.

4.1 Artigo 1 - Colorímetro NIX para avaliação de cor de erva-mate

NIX quality control colorimeter can evaluate color of yerba mate

Dados da Publicação

Autores: Otávio Pereira Câmara; Emanuele Costa; Naimara Vieira do Prado; Luciano Lucchetta; Karla Suzana Moresco; Vânia Cássia Fonseca Burgardt; Alessandra Machado-Lunkes.

Título do periódico: Food Science and Technology

ISSN: 0101-2061 (Print) / 1678-457X (Online)

Editora: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos (SBCTA) / Campinas

Ano de publicação: 2025

Volume: 45

Número do artigo: e00460

DOI: <https://doi.org/10.5327/fst.00460>

Nota sobre Direitos Autorais Este artigo foi publicado no periódico Food Science and Technology. Em conformidade com as políticas de direitos autorais da editora (licença CC BY) e com as normas do Repositório Institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o texto completo do artigo não é reproduzido nesta versão da dissertação. O conteúdo integral pode ser acessado por meio do DOI: <https://doi.org/10.5327/fst.00460>

Resumo Estruturado

A cor da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é um atributo essencial para a aceitação comercial, com o verde intenso sendo associado ao frescor no Brasil, enquanto tons oliva e amarelos caracterizam o produto envelhecido preferido em outros mercados. Embora o sistema CIELAB seja o padrão para medição, o alto custo de equipamentos tradicionais como o Konica Minolta limita sua adoção industrial. O objetivo deste estudo foi comparar o desempenho do colorímetro portátil Nix Quality Control (Nix QC) com o Konica Minolta CR-410, avaliando a viabilidade do Nix QC para pesquisa e padronização da erva-mate.

Foram analisadas 219 amostras de erva-mate em diferentes estágios de envelhecimento. As medições foram feitas em triplicata utilizando o Minolta CR-400 e o Nix QC, ambos com iluminante D65. Coletaram-se as coordenadas L^* , a^* e b^* , além de parâmetros calculados: croma (C^*), índice de perda de cor verde (de-greening, D^*) e índice de amarelecimento (YI).

O estudo demonstrou correlações significativas entre os dispositivos para os principais parâmetros. Os maiores índices de correlação foram observados para a^* ($r = 0,926$) e de-greening ($r = 0,923$). Os parâmetros b^* ($r = 0,788$) e YI ($r = 0,776$) também apresentaram forte associação. A luminosidade (L^*), no entanto, teve correlação moderada ($r = 0,541$) e sem significância estatística. As cartas de controle indicaram que o Nix QC possui maior variabilidade e dispersão em comparação ao Minolta. Contudo, as equações de regressão geraram estimativas com diferenças médias próximas a zero, confirmando um ajuste robusto entre os valores reais do Minolta e os preditos pelo Nix. A portabilidade, o baixo custo e a interface via aplicativo de smartphone do Nix QC foram destacados como vantagens práticas para medições em campo e análises preliminares.

O Nix QC é uma alternativa viável e econômica ao Konica Minolta para avaliar a cor da erva-mate. O dispositivo demonstrou precisão satisfatória na detecção de mudanças cromáticas ao longo do tempo de armazenamento. Sua adoção pode democratizar o controle de qualidade instrumental na indústria, permitindo maior padronização e competitividade do setor sem comprometer a confiabilidade das medições.

4.2 Artigo 2 - Caracterização tecnológica e sensorial da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) ao longo de 12 meses de maturação: relacionando a dinâmica fenólica à evolução da qualidade

Technological and sensory fingerprinting of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) across 12 months of maturation: linking phenolic dynamics to quality evolution

Otávio Pereira Câmara; Naimara Vieira do Prado; Vânia Cássia Fonseca Burgardt; Alessandra Machado-Lunkes; Luciano Lucchetta

Artigo submetido ao periódico: Journal of Food Process Engineering

ISSN: 1745-4530

Editora: Elsevier

Ano de publicação: 2026

Nota sobre Direitos Autorais Este artigo será publicado no periódico : Journal of Food Process Engineering. Em conformidade com as políticas de direitos autorais da editora (licença CC BY) e com as normas do Repositório Institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o texto completo do artigo não é reproduzido nesta versão da dissertação.

Resumo estruturado

Embora o processamento industrial inicial da erva mate (sapeco e secagem) seja bem documentado, a etapa subsequente de maturação, também conhecida como descanso, é um período crítico onde ocorrem reações bioquímicas complexas que definem o perfil sensorial de cor, sabor e aroma. O estudo justifica-se pela lacuna na literatura científica quanto a análises multivariadas que integrem parâmetros físico-químicos e sensoriais de forma robusta. Assim, o objetivo central foi avaliar as modificações nessas variáveis ao longo de um ano, visando subsidiar a padronização industrial e a valorização da erva-mate como um produto de valor agregado.

Os resultados indicaram o fenômeno de "desverdeamento": a erva-mate tornou-se mais clara (aumento de L*) e houve uma transição dos tons verdes para tons amarelo-oliva, confirmada pela mudança do parâmetro a* de valores negativos para positivos. Quanto aos compostos bioativos, verificou-se uma redução geral nos teores de metilxantinas (cafeína e teobromina) e de fenólicos como a catequina e o ácido clorogênico, resultante de processos de oxidação e polimerização. Por outro lado, o ácido cafeico demonstrou estabilidade superior, consolidando-se como um marcador de qualidade para o produto maturado. Sensorialmente, o

produto evoluiu de um perfil "verde-fresco", com notas herbáceas e doces, para um perfil "maduro", caracterizado por uma coloração dourada, maior amargor, adstringência e aromas que remetem à palha e notas tostadas.

Enfatiza-se que a maturação é um processo dinâmico impulsionado por reações oxidativas e enzimáticas residuais. A degradação da clorofila em feofitinas explica a mudança visual, enquanto a polimerização de fenóis simples em taninos condensados de maior peso molecular justifica o incremento na adstringência e no amargor. A PCA foi fundamental para validar essas tendências, explicando 87,56% da variância total e separando claramente as amostras jovens (ricas em clorofila e fenóis livres) das amostras envelhecidas (associadas a compostos oxidados e aromas complexos). A maturação permite "direcionar" o produto para diferentes nichos: o consumidor tradicional, que prefere o frescor verde, e o mercado gourmet ou industrial, que valoriza a complexidade e a estabilidade sensorial da erva envelhecida.

A maturação promove uma reconfiguração profunda na identidade da erva-mate, equilibrando uma perda parcial de antioxidantes livres com um ganho substancial em complexidade sensorial e estabilidade cromática. A estabilidade do ácido cafeico reforça sua viabilidade como indicador químico do estágio de envelhecimento. As implicações para o setor industrial são estratégicas. Os resultados fornecem uma base científica para o controle de qualidade e para a criação de protocolos de maturação controlada que podem agregar valor ao produto. A maturação deixa de ser vista apenas como armazenamento para ser compreendida como uma tecnologia de modulação de qualidade.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos neste estudo, algumas perspectivas para investigações futuras podem ser delineadas:

A expansão da abordagem metodológica para amostras provenientes de diferentes origens geográficas — incluindo regiões produtoras do Brasil, Argentina e Paraguai — permitiria avaliar a influência do terroir, das condições edafoclimáticas e das práticas de cultivo sobre a cinética de maturação e o perfil químico e sensorial final da erva-mate. Tal abordagem contribuiria para o estabelecimento de indicações geográficas e para a valorização de produtos regionais diferenciados.

A avaliação de diferentes condições de armazenamento, como variações de temperatura, umidade relativa, luminosidade e tipo de embalagem, constitui outro eixo prioritário de investigação. A compreensão dos efeitos dessas variáveis sobre a estabilidade dos compostos fenólicos, a atividade de água e os atributos sensoriais ao longo do tempo subsidiaria o desenvolvimento de protocolos industriais mais eficientes e economicamente sustentáveis para o controle da maturação.

A construção de modelos cinéticos de degradação fenólica, baseados nos dados gerados neste e em estudos complementares, representaria avanço significativo para a predição do comportamento químico da erva-mate em função do tempo e das condições de processo.

A aplicação de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) para o mapeamento sistemático da fração volátil da erva-mate ao longo da maturação permitiria identificar e quantificar com maior resolução os compostos responsáveis pelas notas de frescor, palha, tostado e amadeirado observadas sensorialmente. Essa caracterização aprofundada da fração aromática é essencial para correlacionar marcadores voláteis específicos às diferentes fases de maturação e para fundamentar decisões tecnológicas sobre tempo de repouso ideal.

O desenvolvimento de um modelo preditivo industrial, integrando variáveis físico-químicas, fenólicas e cromáticas por meio de técnicas quimiométricas como regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e redes neurais artificiais, abriria caminho para o monitoramento não destrutivo e em tempo real da maturação. Tal modelo poderia ser implementado em linhas de produção, permitindo a padronização de lotes, a rastreabilidade do produto e a definição automatizada do ponto ideal de maturação para cada segmento de mercado.

Por fim, estudos de aceitação do consumidor, conduzidos com diferentes perfis de público — incluindo consumidores tradicionais, apreciadores de produtos gourmet e novos

consumidores de bebidas funcionais — forneceriam informações indispensáveis sobre a percepção e a preferência em relação aos diferentes estágios de maturação. A integração desses dados hedônicos com os resultados físico-químicos e sensoriais descritivos obtidos neste estudo, por meio de abordagens como o mapeamento de preferência externo, consolidaria uma base científica sólida para orientar estratégias de inovação e diferenciação de produto na cadeia produtiva da erva-mate.

REFERÊNCIAS

AKAN, S. Effect of thermal pasteurization on Valencia orange juice color and quality. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 4, p. e13998, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5492**: Análise Sensorial - Vocabulário. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4121**: Análise Sensorial – Guia geral para uso de escalas de respostas quantitativas. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6658**: Análise Sensorial – Metodologia e Orientações Gerais. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 8586**: Análise Sensorial – Guia geral para seleção, treinamento e monitoramento de avaliadores selecionados e de especialistas ou experts. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13299**: Análise Sensorial – Orientação geral para o estabelecimento de um perfil sensorial. Rio de Janeiro, 2017.

BAE, I. K. et al. Simultaneous determination of 15 phenolic compounds and caffeine in teas and mate using RP-HPLC/UV detection: Method development and optimization of extraction process. **Food Chemistry**, v. 172, p. 469-475, abr. 2015.

BENEDITO, D. C. D. et al. Bioactive Compounds Concentrations and Stability in Leaves of *Ilex paraguariensis* Genotypes. **Forests**, v. 14, n. 12, p. 2411, 11 dez. 2023.

BLUM-SILVA, C. H. et al. The influence of leaf age on methylxanthines, total phenolic content, and free radical scavenging capacity of *Ilex paraguariensis* aqueous extracts. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 25, n. 1, p. 1-6, 2015.

BRACESCO, N. et al. Recent advances on *Ilex paraguariensis* research: minireview. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 136, n. 3, p. 379-383, 2010.

BUDIN, A. C. et al. Stability of yerba mate extract, evaluation of its microencapsulation by ionic gelation and fluidized bed drying. **Heliyon**, v. 9, n. 6, p. e16818, 2023.

CABRAL-MALHEIROS, G. **Estudo da Alteração da cor e degradação da clorofila durante armazenagem de erva-mate tipo chimarrão**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado

em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

CÂNDIDO, A. F. D.; ROCHA, M. P. Fitoquímica e Ação Farmacológica de *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil., Aquifoliaceae (erva-mate): uma revisão narrativa. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 8, 2025.

CASSOTTA, M. et al. Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) and Rheumatoid Arthritis: A Systematic Review of Mechanistic and Clinical Evidence. **Nutrients**, v. 17, n. 24, p. 3853, 2025.

CARDOZO, E. L. et al. Methylxanthines and phenolic compounds in mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) progenies grown in Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, n. 7, p. 553-558, nov. 2007.

CARDOZO JUNIOR, E. L. et al. Quantitative genetic analysis of methylxanthines and phenolic compounds in mate progenies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 2, p. 171-177, fev. 2010.

CARDOZO JUNIOR, E. L.; MORAND, C. Interest of mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) as a new natural functional food to preserve human cardiovascular health – A review. **Journal of Functional Foods**, v. 21, p. 440-454, mar. 2016.

CHAVES, J. B. **Controle de qualidade na indústria de alimentos** (princípios gerais). Viçosa: UFV, 1998. 94 p.

DARTORA, N. et al. UPLC-PDA–MS evaluation of bioactive compounds from leaves of *Ilex paraguariensis* with different growth conditions, treatments and ageing. **Food Chemistry**, v. 129, n. 4, p. 1453-1461, dez. 2011.

ESMELINDRO, M. C.; TONIAZZO, G.; WACZUK, A.; DARIVA, C.; OLIVEIRA, D. Caracterização físico-química da erva-mate: Influência das etapas do processamento industrial. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, n. 2, p. 193-204, 2002.

FILIP, R. et al. Phenolic compounds in seven South American *Ilex* species. **Fitoterapia**, v. 72, n. 7, p. 774-778, nov. 2001.

FRIZON, C. N. T.; NISGOSKI, S. Color Parameters to Predict Moisture and Tannin Content in Yerba Mate Process. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 2, 2020.

GARCÍA, V.; DRUNDAY, F.; CALVIÑO, A. Quantification of sensory specific satiety and desire to eat bitter or sweet-bitter infusions of yerba mate in women with normal weight. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 5, p. 17524-17535, 23 maio 2023.

GERBER, T. et al. Yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) for new therapeutic and nutraceutical interventions: A review of patents issued in the last 20 years (2000–2020). **Phytotherapy Research**, v. 37, n. 2, p. 527-548, 30 fev. 2023.

GONÇALVES, I. L. et al. Accelerated maturation of processed yerba-mate under the controlled conditions of temperature and humidity. **Nutrition and Food Science**, v. 45, n. 4, p. 564-573, 13 jul. 2015.

GONÇALVES, I. L.; VALDUGA, A. T. Trends in *Ilex paraguariensis* researches: a bibliometric analysis. **Journal of Ethnic Foods**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2023.

GRIGIONI, G. et al. Flavour characteristics of *Ilex paraguariensis* infusion, a typical Argentine product, assessed by sensory evaluation and electronic nose. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 84, n. 5, p. 427-432, 2004.

HOLOWATY, S. A.; SURKAN, S. A.; TRELA, V. D.; BYCZKO, G. D.; SCHMALKO, M. E. Variation of physicochemical and sensory properties during the aging of yerba mate. **International Journal of Food Studies**, v. 3, p. 228-238, 2014.

HOLOWATY, S. A. et al. Yerba Maté (*Ilex paraguariensis* St. Hil.): Chemical and Physical Changes under Different Aging Conditions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, n. 1, p. 19-30, 10 fev. 2016.

IOMMI, C. **Chemistry and Safety of South American Yerba Mate Teas**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

ISOLABELLA, S.; COGOI, L.; LÓPEZ, P.; ANESINI, C.; FERRARO, G.; FILIP, R. Study of the bioactive compound's variation during yerba mate (*Ilex paraguariensis*) processing. **Food Chemistry**, v. 122, p. 695-699, 2010.

LAWLESS, H. T.; HEYMANN, H. **Sensory Evaluation of Food: Principles and practices**. 2. ed. New York, NY: Springer, 2010.

LI, Y.; ZHANG, S.; SUN, Y. Measurement of catechin and gallic acid in tea wine with HPLC. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 27, n. 1, p. 214-221, jan. 2020.

LOMBARDELLI, C. et al. A Comprehensive Study on the Development of an Isotonic Sports Drink Preserved by UV-C Light Assisted by Mild Heat and Loaded with Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) Extract. **Foods**, v. 14, n. 9, p. 1494, 24 abr. 2025.

MACCARI JUNIOR, A. **Análise do pré-processamento da erva-mate para chimarrão**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MACCARI JUNIOR, A.; SANTOS, A. P. R. Parâmetros tecnológicos para utilização industrial da erva-mate. In: PARANÁ. Câmara Setorial da Cadeia Produtiva da Erva-Mate. **Produtos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia produtiva da erva-mate**. Curitiba: Ed. do autor, 2000. Série PADCT III, n. 1. p. 43-68.

MARQUES TENÓRIO PEREIRA, C. et al. Análise sensorial descritiva quantitativa de geleia de gabirola (*Camponesia cambessedeanana*). **DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, v. 7, n. Especial, p. 3-10, 26 mar. 2020.

MATEOS, R.; BAEZA, G.; SARRIA, B.; BRAVO, L. Improved LC-MSn characterization of hydroxycinnamic acid derivatives and flavonols in different commercial mate (*Ilex paraguariensis*) brands. Quantification of polyphenols, methylxanthines, and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 241, p. 232-241, 2018.

MAZUCHOWSKI, J. Z. **Manual da erva-mate: *Ilex paraguariensis* St. Hill.** 2. ed. Curitiba: EMATER/PR, 1991. 104 p.

MENDES, R. M. O. **Caracterização e avaliação da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)**, beneficiada no estado de Santa Catarina. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MEYNERS, M.; HASTED, A. On the applicability of ANOVA models for CATA data. **Food Quality and Preference**, v. 92, p. 104219, set. 2021.

MOREIRA TERHAAG, M. et al. Development of an Innovative and Functional Yerba Mate—Lychee Beverage: Sensory and Physicochemical Characteristics. **Food Safety and Health**, v. 3, n. 1, p. e70064, 2025.

MURRAY, J. M.; DELAHUNTY, C. M.; BAXTER, I. A. Descriptive sensory analysis: Past, present and future. **Food Research International**, v. 34, n. 6, p. 461-471, 2001.

NAJMAN, K. et al. Changes in the Physicochemical and Bioactive Properties of Yerba Mate Depending on the Brewing Conditions. **Molecules**, v. 29, n. 11, 1 jun. 2024.

NEWALL, C. A.; ANDERSON, L. A.; PHILLIPSON, J. D. Herbal medicines. London: **The Pharmaceutical Press**, 1996. 296 p.

OHTAKI, V. M. et al. Ultra-refined yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) as a potential naturally colored food ingredient. **Scientia Agricola**, v. 80, 2023.

PALAVICINI, S. M. S. et al. Bioactive Compounds of *Ilex paraguariensis*: A Critical Update on Extraction, Gastrointestinal Stability, and Technological Applications. **Journal of Food Science**, 2025.

PALAZZOLO, M. A. et al. Processing spent yerba mate by pyrolysis to methoxyphenol-rich oil. **Waste Management**, v. 205, p. 115030, ago. 2025.

PARANÁ. **Secretaria da Agricultura e do Abastecimento**. Erva-mate Análise da conjuntura – Safra 2019/20. Paraná, 2019. Disponível em: http://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2019-12/erva-mate_2020.pdf. Acesso em: 02 ago. 2020.

PERALTA, J. M.; SCHMALKO, M. E. Modeling heat and mass transfer in the heat treatment step of yerba mate processing. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p. 73-82, 2007.

PLATKIEWICZ, J. et al. Antioxidant Capacity, Phenolic Compounds, and Other Constituents of Cold and Hot Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) Infusions. **Antioxidants**, v. 13, n. 12, p. 1467, 29 nov. 2024.

RAKOCEVIC, M. et al. Stability of Leaf Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) Metabolite Concentrations over the Time from the Prism of Secondary Sexual Dimorphism. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2199, 1 jun. 2023.

RAMIREZ, M. R. et al. Effect of Processing on the Nutritional Quality of *Ilex paraguariensis*. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 5, 1 mar. 2022.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. *Biologia Vegetal*. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2001. 906 p.

REZZANI, G. D.; SALVAY, A. G.; PELTZER, M. A. Yerba Mate and Water Kefir Grain Films for Food Preservation and Freshness Indicators. **Food and Bioprocess Technology**, v. 18, p. 1-15, 2025.

RIACHI, L. G.; SIMAS, D. L. R.; COELHO, G. C.; MARCELLINI, P. S.; SILVA, A. J. R. S.; MARIA, C. A. B. Effect of light intensity and processing conditions on bioactive compounds in mate extracted from yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.). **Food Chemistry**, v. 266, p. 317-322, 2018.

RODRIGUEZ, J. M. F. et al. Pressurized liquid extraction as a strategy to recover bioactive compounds from yerba mate (*Ilex paraguariensis* St.-Hil.) processing waste. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 203, p. 106088, dez. 2023.

ROSTAGNO, M. A. et al. Fast and simultaneous determination of phenolic compounds and caffeine in teas, mate, instant coffee, soft drink and energetic drink by high-performance liquid chromatography using a fused-core column. **Analytica Chimica Acta**, v. 685, n. 2, p. 204-211, jan. 2011.

RUBÉN, O. et al. Chlorophyll Stability in Yerba Maté Leaves in Controlled Atmospheres. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 1, 1999.

RZĄSA-DURAN, E. et al. *Ilex paraguariensis* Extracts: A Source of Bioelements and Biologically Active Compounds for Food Supplements. **Applied Sciences**, v. 14, n. 16, p. 7238, 17 ago. 2024.

SANTOS, D. F. DOS et al. Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) Processing and Extraction: Retention of Bioactive Compounds. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 78, n. 3, p. 526-532, 19 set. 2023.

SANTOS POLIDORO, A. DOS et al. Analytical and chemometric strategies for elucidation of yerba mate composition. **Food Chemistry**, v. 429, p. 136918, dez. 2023.

SCHMALKO, M. E.; ALZAMORA, S. M. Color, chlorophyll, caffeine, and water content variation during yerba-mate processing. **Drying Technology**, v. 19, n. 3, p. 597-608, 2001.

SCHWARTZ, S. J.; ELBE, J. H. Kinetics of Chlorophyll Degradation to Pyropheophytin in Vegetables. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 4, p. 1303-1306, 1983.

SENINDE, D. R.; CHAMBERS, E. Comparing the impact of Check-All-That-Apply (CATA) and Check-All-Statements (CAS) question formats on "agree" responses for different consumers' age groups and genders across five countries. **Journal of Sensory Studies**, 13 jul. 2021.

SOLA, I. M. M. S. et al. Circular economy opportunities in the yerba mate industry: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 105, n. 2, p. 1-12, 2025.

STREIT, N. M. et al. Relation among taste-related compounds (phenolics and caffeine) and sensory profile of erva-mate (*Ilex paraguariensis*). **Food Chemistry**, v. 102, p. 560-564, 2007.

THEWES, F. R. et al. The isolated effect of low oxygen and high carbon dioxide on yerba mate quality keeping. *Bragantia*, v. 80, p. 1-11, 2021.

TOMASI, J. DE C. et al. Effects of different drying methods on the chemical, nutritional and colour of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) leaves. **International Journal of Food Engineering**, v. 17, n. 7, p. 551-560, 16 jul. 2021.

VALERGA, J.; RETA, M.; LANARI, M. C. Polyphenol input to the antioxidant activity of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) extracts. **LWT-Food Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 28-35, 2012.

VALDUGA, A. T.; FINZER, J. R. D.; MOSELE, S. H. Processamento de Erva-Mate. Erechim, RS: **EdiFAPES**, 2003. p. 33-174.

VALDUGA, A. T. et al. Cytotoxic/antioxidant activity and sensorial acceptance of yerba-mate development by oxidation process. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 1, p. 115, 1 jan. 2016.

VALDUGA, A. T. et al. Chemistry, pharmacology and new trends in traditional functional and medicinal beverages. **Food Research International**, v. 120, p. 478-503, 1 jun. 2019.

VALDUGA, E. Caracterização química e anatômica da folha de *Ilex paraguariensis* Saint Hilaire e de algumas espécies utilizadas na adulteração do mate. 1995. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

VASCONCELLOS, A. C. New insights about the beneficial properties of yerba mate for human health. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ZAIONS, I. et al. Physico-chemical characterization of *Ilex paraguariensis* St. Hil. during the maturation. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 5, p. 663-667, 2014.