

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BRUNA MAYARA CITATIN CÓRDOVA

CONCENTRAÇÕES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA EM FOLHAS E GALHOS DE
ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis*) NATIVA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
AGRONÔMICAS

LAGES, SC

2025

BRUNA MAYARA CITATIN CÓRDOVA

**CONCENTRAÇÕES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA EM FOLHAS E GALHOS DA
ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis*) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
AGRONÔMICAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Alves Moreira

Coorientadora: Prof. Dra. Mari Lúcia Campos

LAGES, SC

2025

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária UDESC, com os dados
fornecidos pelo(a) autor(a)**

Córdova, Bruna Mayara Citatin de
CONCENTRAÇÕES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA EM
FOLHAS E GALHOS DE ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis*)
NATIVA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES AGRONÔMICAS /
Bruna Mayara Citatin de Córdova. -- 2025.
59 p.

Orientador: Marcelo Alves Moreira
Coorientadora: Mari Lúcia Campos
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2025.

1. Ervais nativos. 2. Compostos bioativos. 3. Metilxantinas.
4. HPLC. 5. Condições de cultivo. I. Moreira, Marcelo Alves . II.
Campos, Mari Lúcia . III. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

BRUNA MAYARA CITATIN DE CÓRDOVA

**CONCENTRAÇÕES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA EM FOLHAS E GALHOS DA
ERVA-MATE (*Ilex Paraguariensis*) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES
AGRONÔMICAS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Alves Moreira

Coorientadora: Prof. Dra. Mari Lúcia Campos

BANCA EXAMINADORA

Orientador:

Dr. Marcelo Alves Moreira

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Dr. Cristian Soldi

UFSC/Curitibanos-SC

Dr. Damianni Sebrão

UDESC/Balneário Camboriú-SC

Lages, 25 de fevereiro de 2025.

Dedico aos meus pais, que sempre apoiaram e incentivaram as minhas escolhas, com todo meu amor!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por conduzir minhas escolhas, guiar meus caminhos e iluminar minha jornada científica, além de me conceder a sabedoria para iniciar e concluir este trabalho.

Aos meus pais, pelo constante incentivo e apoio nas minhas decisões. Sou imensamente grata por todo amor, carinho e confiança que sempre depositaram em mim. Vocês são meus exemplos diários e, sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu companheiro de vida, Gabriel, que esteve ao meu lado durante toda a minha trajetória acadêmica, me apoiando e me incentivando a nunca desistir. Você é minha calmaria em meio à loucura da vida.

Às minhas irmãs, Marcela, Camila, Ana Clara, Nathalia e Emanuelle, pelo carinho, respeito e incentivo. Que sorte a minha ter todas vocês!

Às minhas amigas Gabriela Polmann e Natacha. Vocês foram essenciais nessa jornada. Obrigada por toda ajuda, troca de conhecimento, conversas, risadas, acolhimento e pela amizade que construímos.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Bruno, Elias, Gustavo, Gabriela Castro, Gabriela Sagas, Isabela e Renata. Agradeço pelo suporte, auxílio e experiências compartilhadas. Vocês tornaram essa caminhada muito mais leve.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Alves Moreira, pela orientação e por todo o conhecimento compartilhado. Agradeço pela sua participação e por sempre me proporcionar confiança e autonomia.

À minha coorientadora, professora Dra. Mari Lúcia Campos, pela disponibilidade, carinho e por me mostrar o brilho que existe no mundo da pesquisa. Você é uma inspiração!

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas contribuições valiosas.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e à CAPES, pela concessão da Bolsa de Mestrado, assim como ao corpo docente do programa, em especial ao professor Dr. David Miquelluti, pelos ensinamentos e pela paciência.

Muito obrigada a todos!

“Aonde fica a saída?”, perguntou Alice ao gato que ria.
“Depende”, respondeu o gato.
“De que?”, replicou Alice;
“Depende de para onde você quer ir...”

(Alice no País das Maravilhas, 1865).

RESUMO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*), nativa do Paraguai, Brasil e Argentina, é um produto de grande valor histórico e cultural, desempenhando um papel significativo na economia dos municípios do Sul do Brasil. Além do consumo tradicional na forma de infusão, a planta apresenta uma gama de compostos bioativos, como saponinas, alcaloides, compostos fenólicos e óleos essenciais, responsáveis por diversos benefícios à saúde, o que amplia suas aplicações. Neste contexto, este estudo investigou a influência de condições agronômicas (luminosidade e características químicas do solo) nas concentrações de cafeína e teobromina em ervais nativos. A pesquisa buscou determinar como essas condições influenciam a produção de cafeína e teobromina em folhas e galhos, testando a hipótese de que a erva-mate cultivada a pleno sol produziria maiores concentrações desses compostos, e que plantas em solos menos férteis exibiriam maiores concentrações de cafeína e teobromina. Contudo, o objetivo do estudo foi analisar as concentrações de cafeína e teobromina em folhas e galhos, avaliar a influência da luminosidade e das características do solo, determinar a variação dessas concentrações em diferentes locais de plantio e investigar a relação entre os micronutrientes do solo e as concentrações de cafeína e teobromina. A metodologia envolveu a coleta de amostras de folhas e galhos em ervais nativos nos municípios de Urupema (1460 m de altitude, 13°C de temperatura média anual) e Paineira (1250 m de altitude, 16°C de temperatura média anual), Santa Catarina. As extrações foram realizadas no laboratório de química do CAV – UDESC de Lages, de acordo com a metodologia de Lopes (2007), e a quantificação das substâncias foi feita por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Para a análise estatística dos dados, foi utilizado o modelo linear hierárquico de efeito fixo, seguido de testes de comparação de médias (F e t). Os resultados mostraram variações significativas nas concentrações de cafeína e teobromina entre os municípios. Em Urupema, as concentrações de cafeína foram mais elevadas (ex: 97,9 µg.L⁻¹ em folhas expostas ao sol), possivelmente influenciadas pela maior altitude e temperaturas mais baixas. As concentrações de teobromina também apresentaram diferenças entre as áreas, com Paineira apresentando teores mais elevados em folhas (0,6 µg.L⁻¹) do que em galhos (0,2 µg.L⁻¹). A análise sugere que os fatores climáticos locais influenciam diretamente a produção dessas substâncias, possivelmente como uma resposta adaptativa das plantas ao estresse ambiental, resultando na maior produção de metabólitos secundários. Esse estudo ressalta a importância de considerar as condições ambientais na avaliação das propriedades bioativas da erva-mate, especialmente no contexto de cultivos nativos. Os resultados contribuem para uma melhor compreensão das relações entre fatores climáticos e a

produção de compostos bioativos, fornecendo dados positivos para práticas de manejo mais eficientes e para a valorização da planta em diferentes contextos agronômicos e culturais.

Palavras-chave: Ervais nativos; Compostos bioativos; Metilxantinas; HPLC; Condições de cultivo.

ABSTRACT

Yerba mate (*Ilex paraguariensis*), native to Paraguay, Brazil, and Argentina, is a product of great historical and cultural value, playing a significant role in the economy of municipalities in southern Brazil. In addition to its traditional consumption as an infusion, the plant contains a range of bioactive compounds—such as saponins, alkaloids, phenolic compounds, and essential oils—that are responsible for various health benefits, expanding its potential applications. In this context, this study investigated the influence of agronomic conditions (light availability and soil chemical characteristics) on the concentrations of caffeine and theobromine in native yerba mate stands. The research aimed to determine how these conditions influence the production of caffeine and theobromine in leaves and branches, testing the hypothesis that yerba mate grown in full sun would produce higher concentrations of these compounds, and that plants grown in less fertile soils would exhibit higher concentrations of caffeine and theobromine. However, the objective of the study was to analyze the concentrations of caffeine and theobromine in leaves and branches, evaluate the influence of light exposure and soil characteristics, determine the variation of these concentrations in different growing locations, and investigate the relationship between soil micronutrients and the concentrations of caffeine and theobromine. The methodology involved sampling leaves and branches from native yerba mate stands in the municipalities of Urupema (1460 m altitude, 13°C average annual temperature) and Paineira (1250 m altitude, 16°C average annual temperature), Santa Catarina, Brazil. Extractions were performed at the chemistry laboratory of CAV – UDESC in Lages, following the methodology of Lopes (2007), and quantification of the substances was carried out using high-performance liquid chromatography (HPLC). For statistical analysis, a fixed-effect hierarchical linear model was applied, followed by mean comparison tests (F and t tests). The results showed significant variations in caffeine and theobromine concentrations between the municipalities. In Urupema, caffeine concentrations were higher (e.g., 97.9 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in sun-exposed leaves), possibly influenced by higher altitude and lower temperatures. Theobromine concentrations also differed between areas, with Paineira presenting higher levels in leaves (0.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) than in branches (0.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). The analysis suggests that local climatic factors directly influence the production of these substances, possibly as an adaptive response of the plants to environmental stress, resulting in increased production of secondary metabolites. This study highlights the importance of considering environmental conditions when evaluating the bioactive properties of yerba mate, especially in the context of native cultivation. The findings contribute to a better understanding of the relationship between climatic factors and the

production of bioactive compounds, providing valuable data for more efficient management practices and for the valorization of the plant in various agronomic and cultural contexts.

Keywords: Native yerba mate stands; Bioactive compounds; Methylxanthines; HPLC; Cultivation conditions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Árvores de erva-mate em erval nativo.....	18
Figura 2 – Mapa do cultivo de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>) no Brasil, destacando as principais regiões produtoras. O Paraná é o maior produtor, seguido pelo Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul.....	20
Figura 3 – Fórmula estrutural da Cafeína.....	24
Figura 4 – Fórmula estrutural da Teobromina.....	26
Figura 5 – Localização geográfica das áreas de coleta de erva-mate nos municípios treinados (Urupema e Paineira, SC)	28
Figura 6 – Fluxograma do modelo linear hierárquico de efeitos fixos utilizado nas análises de folhas e galhos de erva-mate. O modelo considera três níveis hierárquicos: o primeiro nível com os locais (Paineira e Urupema), o segundo nível com os ambientes (sol e sombra) e o terceiro com as partes da planta (folha e galho)	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>) nos estados do Brasil, conforme os dados do PAM (Produção Agrícola Municipal) e do PEVS (Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura).....	21
Tabela 2 - Principais Aplicações Industriais e Comerciais da Erva-Mate: Usos de Subprodutos em Diversos Setores e suas formas de utilização.....	22
Tabela 3 - Atividades Biológicas dos Compostos Presentes na Erva-Mate: Efeitos Terapêuticos e Medicinais.....	23
Tabela 4 - Características Químicas e teor de argila dos Solos coletados em áreas de produção de erva-mate nos municípios de Painei e Urupema.....	33
Tabela 5 - Concentração de fósforo e potássio disponíveis nas folhas de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema.....	37
Tabela 6 - Concentração de cafeína presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema	38
Tabela 7 - Concentração de cafeína presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado.....	39
Tabela 8 - Concentração de cafeína presentes em partes da planta (folha e galho) erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado, e partes da planta (folha e galho).	40
Tabela 9 - Concentração de teobromina presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema.....	41
Tabela 10 - Concentração de teobromina presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado...	43
Tabela 11 - Concentração de teobromina presentes em partes da planta (folha e galho) de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado, e partes da planta (folha e galho).....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAV	Centro de Ciências Agroveterinárias
CLAE	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
HPLC	High-Performance Liquid Chromatography
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa
MO	Matéria Orgânica
PAM	Produção Agrícola Municipal
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
pH	Potencial hidrogeniônico
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
UV-VIS	Ultravioleta-Visível
SMP	Shoemaker, Mac lean e Pratt.

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
B	Boro
Ca	Cálcio
Cu	Cobre
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
K	Potássio
Mn	Manganês
Mg	Magnésio
P	Fósforo
S	Enxofre
Zn	Zinco
%	Por cento
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	HIPÓTESE	17
1.2	OBJETIVO GERAL	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ASPECTOS HISTÓRICOS E BOTÂNICOS	18
2.2	IMPORTÂNCIA ECONÔMICA	19
2.3	APLICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DA ERVA-MATE.....	21
2.4	METABÓLITOS SECUNDÁRIOS	24
2.4.1	Cafeína	24
2.4.2	Teobromina	25
3	MATERIAL E MÉTODO	28
3.1	LOCAIS DE COLETA	28
3.2	COLETA DAS AMOSTRAS	29
3.2.1	Coleta de folhas e galhos.....	29
3.2.2	Coleta de Solo.....	29
3.3	ANÁLISES.....	29
3.3.1	Análises de solo	29
3.3.2	Análise de fósforo e potássio em folhas	30
3.3.3	Análise de cafeína e teobromina em folhas e galhos	30
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1	ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	33
4.2	ANÁLISE DE FÓSFORO E POTASSIO NAS FOLHAS	36
4.3	CAFEÍNA	37
4.3.1	Painel e Urupema.....	37
4.3.2	Pleno sol e Sombra.....	39
4.3.3	Folhas e Galhos	40
4.4	TEOBROMINA.....	41
4.4.1	Painel e Urupema.....	41
4.4.2	Pleno sol e Sombra.....	42
4.4.3	Folhas e Galhos	44

CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXO A – CROMATOGRAMA DAS ANÁLISES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA REALIZADAS NAS FOLHAS DE ERVA-MATE.....	55
ANEXO B - CROMATOGRAMA DAS ANÁLISES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA REALIZADAS NOS GALHOS DE ERVA-MATE.....	56

1 INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*), planta nativa do Paraguai, Brasil e Argentina, é cultivada exclusivamente nesses países, que são os únicos produtores mundiais. No Brasil, a produção e o consumo concentram-se majoritariamente nos estados do Sul, que se destacam como os principais polos do mercado (Cardozo, 2021).

Além de seu valor cultural e histórico, a erva-mate desempenha um papel essencial na economia de muitos municípios do Sul do Brasil, sendo um produto de destaque na agricultura familiar e no agronegócio florestal, especialmente no Rio Grande do Sul, onde é o principal produto não madeireiro (Antoniazzi, 2018).

Essa espécie é exportada para diversos países, como Europa, Estados Unidos, Síria e Japão, sendo comercializada como planta moída ou em extratos utilizados em fórmulas herbais e produtos nutricionais funcionais. Entre os benefícios atribuídos à erva-mate estão suas propriedades estimulantes, diuréticas, antioxidantes e redutoras de peso (Cogoi, 2011).

Tradicionalmente, a erva-mate é consumida em infusões, como o chimarrão e o tererê. No entanto, suas aplicações vão além dessas práticas devido à presença de diversos compostos bioativos, como saponinas, alcaloides, compostos fenólicos, óleos essenciais, além de vitaminas e minerais (Gelsleichter, 2021).

Esses compostos são responsáveis por uma série de efeitos benéficos à saúde, com impactos no sistema nervoso central, cardiovascular, renal e digestivo, e ainda apresentam propriedades diuréticas, antioxidantes, eupépticas e coleréticas (Rossa, 2017).

O uso do extrato da erva-mate e o desenvolvimento de produtos com maior potencial tecnológico ganharam destaque nos estudos dessa planta, resultando em sua crescente valorização. Os compostos bioativos presentes na erva-mate, como as metilxantinas (incluindo a cafeína e a teobromina), são os principais responsáveis por seus benefícios.

O estudo e o uso do extrato de erva-mate, bem como o desenvolvimento de produtos com maior potencial tecnológico, têm ganhado crescente relevância. Os compostos bioativos presentes, como as metilxantinas — especialmente a cafeína e a teobromina — são os principais responsáveis pelos benefícios atribuídos à planta. Compreender a composição desses compostos é crucial para aumentar a valorização e promover o crescimento do consumo da erva-mate. Além disso, é essencial investigar os fatores que influenciam as variações em suas concentrações, como diferentes condições de luminosidade e sistemas de cultivo (Pires, 2016).

A erva-mate possui características que permitem seu cultivo tanto a pleno sol quanto em ambientes sombreados. Estudos indicam que o tipo de erval pode influenciar sua composição química, diferenciando-se entre ervais nativos e cultivados. Os ervais nativos, formados naturalmente em florestas nativas, apresentam diferenças nas concentrações de compostos presentes na planta, conforme relatado na literatura, quando comparados a ervais cultivados (Pires, 2016).

A aplicação do extrato da erva-mate e a criação de produtos com maior capacidade tecnológica ganharam relevância nos estudos desta planta, levando à sua valorização crescente. Os compostos bioativos encontrados na erva-mate, tais como as metilxantinas (que incluem a cafeína e a teobromina), são os principais impulsionadores de suas vantagens. É fundamental entender a composição desses compostos para potencializar a valorização e o crescimento do consumo do produto. Além disso, é necessário investigar os fatores que afetam as variações na sua concentração, como diferentes condições de luz e variados métodos de cultivo (Pires, 2016).

As metilxantinas, encontradas na erva-mate, são originadas de bases púricas, que contêm nitrogênio heterocíclico e exercem uma atividade fisiológica relevante. A cafeína é a metilxantina predominante na erva-mate, seguida pela teobromina. As duas exercem ações parecidas, diferindo apenas na intensidade com que impactam os sistemas orgânicos (Freitas, 2011; Nunes, 2015).

Neste contexto, é importante ressaltar a necessidade de aprofundar os estudos sobre as condições que influenciam as concentrações de compostos na erva-mate, para potencializar sua valorização e ampliar seu consumo. Embora haja alguns estudos na literatura que buscam identificar alternativas comerciais, ainda há uma lacuna significativa na pesquisa sobre esse tema. Assim, o objetivo deste estudo é analisar as concentrações de cafeína e teobromina em erval nativo cultivado sob condições de pleno sol e sombreamento, avaliando a influência dessas condições nas concentrações presentes em folhas e galhos da planta. Além disso, busca-se verificar se a altitude e as características do solo nas regiões estudadas influenciam a síntese desses metabólitos, contribuindo para um melhor entendimento sobre os fatores que determinam a qualidade química da erva-mate.

1.1 HIPÓTESE

A erva-mate cultivada em pleno sol produz as maiores concentrações de cafeína e teobromina em folhas e galhos.

Plantas de erva-mate em ervais nativos desenvolvidos em solos menos férteis exibem concentrações mais elevadas de cafeína e teobromina, quando comparadas às plantas cultivadas em solos com maior fertilidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é analisar as concentrações de cafeína e teobromina em folhas e galhos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em ervais nativos, avaliando a influência da luminosidade (pleno sol vs. sombreamento) e das características químicas do solo sobre a produção desses metabólitos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a diferença nas concentrações de cafeína e teobromina em folhas e galhos da erva-mate.

Verificar a relação entre as concentrações de cafeína e teobromina e o cultivo das plantas à pleno sol e à sombra.

Determinar a variação nas concentrações de cafeína e teobromina em função do local (propriedade rural) de plantio.

Investigar a relação entre os micronutrientes do solo e a concentração de cafeína e teobromina.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS E BOTÂNICOS

O nome científico da erva-mate foi atribuído pelo botânico francês Auguste de Saint-Hilaire (1779-1853) no início do século XIX onde ele estudou e classificou diversas plantas no sul do Brasil, segundo os critérios da Botânica. Entre elas, destacou-se a "árvore-do-mate", utilizada na época para a produção da chamada "erva do Paraguai" ou "mate" (Mazuchowski, 1991).

A erva-mate é uma angiosperma dicotiledônea da ordem *Aquifoliales*, pertencente à família *Aquifoliaceae* e ao gênero *Ilex*, justificando sua denominação científica: *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. Esta espécie contém um caule que é um tronco de cor acinzentada, geralmente com 20 a 25 centímetros de diâmetro, podendo chegar aos 50 centímetros. A altura é variável, dependendo da idade, podendo atingir 15 metros de altura, mas, geralmente quando podadas, não ultrapassam os 7 metros (Da Croce; Floss, 1999; Mendes, 2005; Freitas, 2011).

Figura 1: Árvores de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em erval nativo



Fonte: ACR (Associação Catarinense de empresas florestais), 2024.

A erva-mate é uma espécie que se adapta tanto a ambientes sombreados quanto não sombreados, com fácil regeneração (Carvalho, 2003). Esta planta se adapta a climas temperados úmidos, com temperaturas de 15°C a 21°C e precipitação entre 1.200 e 1.500 mm anuais, mas

também ocorre em climas subtropicais e tropicais. É resistente a geadas e em relação à umidade, desenvolve-se melhor em solos permeáveis, típicos de regiões de clima temperado chuvoso, sem estação seca e com verões amenos, características que favorecem os estados do sul do Brasil, como Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina (Freitas, 2011).

A erva-mate ocorre naturalmente em solos de baixa fertilidade, caracterizados por baixos teores de cátions trocáveis, alto teor de alumínio e pH ácido. A espécie é raramente encontrada em solos arenosos com menos de 15% de argila, solos hidromórficos ou rasos (Carvalho, 2003).

A estrutura da erva-mate responde às condições ambientais, como luz e nutrientes, influenciando sua morfologia e fisiologia sendo a luz solar o principal fator para a fotossíntese, devendo ter intensidade e duração adequadas ao crescimento (Mazuchowski, 2007).

Nativa do Paraguai, Brasil e Argentina, a erva é consumida principalmente na forma de bebidas, como chimarrão, chá-mate e tererê sendo o primeiro, a bebida tradicional da região Sul do Brasil (Cardozo, 2021).

Relacionada aos aspectos culturais, a erva-mate foi um dos pilares econômicos do Sul do Brasil, gerando empregos e incentivando a mão de obra familiar nas áreas de cultivo. Com o passar dos anos, seu consumo se tornou um hábito comum entre os moradores da região. Além de seus impactos sociais e econômicos, a erva é valorizada por suas propriedades nutritivas, medicinais e estimulantes, além de oferecer proteção contra processos oxidativos (Vieira, 2009).

Atualmente, o termo "erva-mate" é amplamente empregado tanto para se referir à planta quanto ao produto industrializado, composto majoritariamente por folhas e pequenos ramos (Pagliosa, 2009). Esse produto é obtido por meio de processos de secagem e fragmentação, sendo amplamente utilizado no preparo de bebidas tradicionais, como o chimarrão e o tererê (Maccari, 2005).

2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é o principal produto não madeireiro do agronegócio florestal no Sul do Brasil, impulsionando setores econômicos, culturais, socioambientais e políticos, além de ser uma importante fonte de renda para pequenas propriedades familiares (Goulart, 2022).

Líder mundial, o Brasil é o principal produtor de erva-mate. Segundo Nogueira (2021), em 2021 o País produziu 1.064.121 mil toneladas em áreas nativas e plantadas, seguidos pela Argentina, que produziu 882.095 mil toneladas.

Conforme dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Pesquisa), apenas quatro estados brasileiros são produtores de erva-mate: Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul, como apresenta a figura 2.

Figura 2: Mapa do cultivo de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no Brasil, destacando as principais regiões produtoras. O Paraná é o maior produtor, seguido pelo Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul.



Fontes: PAM (Produção Agrícola Municipal), Censo agropecuário e IBGE 2023.

No Brasil, O IBGE realiza duas pesquisas distintas sobre a produção de erva-mate. A PAM (Produção Agrícola Municipal) apresenta dados referentes ao cultivo em plantios diretos, enquanto a PEVS (Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura) abrange informações sobre a colheita em ervais nativos (Trevisan, 2023).

A tabela 1 apresenta dos dados de produção de erva-mate em toneladas no ano de 2021, comparando as informações obtidas pelas pesquisas PAM e PEVS.

Tabela 1: Produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) nos estados do Brasil, conforme os dados do PAM (Produção Agrícola Municipal) e do PEVS (Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura).

Estados	PAM	PEVS	Total	%
Paraná	238.110	442.819	680.929	64%
Santa Catarina	76.763	37.144	113.907	11%
Rio Grande do Sul	242.018	26.171	268.189	25%
Mato Grosso do Sul	1.096	0	1.096	0%
Brasil	557.987	506.134	1.064.121	100%

Fontes: Adaptado de Nogueira (2021).

Os dados da Tabela 1 mostram que o Paraná é o maior produtor nacional de erva-mate, responsável por 64% da produção nacional, sendo essa produção majoritariamente oriunda de ervais nativos. Santa Catarina e Rio Grande do Sul ocupam o segundo e terceiro lugar, respectivamente, seguidos por Mato Grosso do Sul, cujo cultivo é exclusivamente de plantio direto, com uma produção de apenas 1.096 toneladas, tornando-se irrelevante no contexto nacional.

O Brasil apresenta uma divisão quase equilibrada entre a produção de erva-mate cultivada (52%) e a extraída de ervais nativos (48%), o que destaca a importância da preservação e do manejo sustentável desses ervais.

2.3 APLICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DA ERVA-MATE

Tradicionalmente, a erva-mate é consumida como chimarrão (quente) ou tererê (frio), mas seu uso se estende às indústrias estética, alimentícia e farmacêutica. Está presente em cremes, balas, gomas, cápsulas e extratos, aproveitando suas propriedades medicinais. Esses diversos usos decorrem da riqueza de compostos químicos em sua composição. Entre esses compostos, destacam-se as saponinas, alcaloides, compostos fenólicos e óleos essenciais (Gelsleichter, 2021).

A Tabela 2 ilustra diversas possibilidades de utilização da erva-mate em diversos processos industriais.

Tabela 2: Principais Aplicações Industriais e Comerciais da Erva-Mate: Usos de Subprodutos em Diversos Setores e suas formas de utilização.

Aplicação Industrial	Subprodutos comerciais	Forma de Utilização
bebidas	chimarrão, tererê, chá mate(queimado ou verde), mate solúvel	infusão quente ou fria
	refrigerantes, suco, cerveja e vinho	extrato de folha diluído
insumos de alimentos	corante natural e conservante alimentar	clorofila e óleo essencial
	sovetes, balas, bombons, chicletes e gomas	
medicamentos	estimulante do sistema nervoso central	extrato de cafeína e teobromina
	composto para tratamento de hipertensão, bronquite e pneumonia	extrato de flavonoides
higiene geral	bactericida e antioxidante; hospitalar e doméstico; esterilizante e emulsificante	extrato de saponina e óleo
	tratamento de esgoto; reciclagem de lixo urbano	
produtos de uso pessoal	perfumes, desodorantes, cosméticos, sabonetes	extrato de folhas seletivo e clorofila

Fonte: (Pagliosa, 2009).

A erva-mate apresenta aplicações inovadoras, como o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis. Seus extratos, ricos em compostos fenólicos, podem aprimorar as propriedades dessas embalagens e auxiliar no armazenamento de alimentos. Além disso, esses extratos funcionam como antioxidantes e conservantes naturais, prolongando a vida útil dos produtos alimentares (Da Costa, 2023).

Os derivados da erva-mate possuem diversas propriedades benéficas à saúde, como efeitos antioxidantes, diuréticos e hepatoprotetores. Estudos indicam seu potencial na redução de peso e no combate à obesidade, além de ações quimiopreventivas contra certos tipos de câncer. A erva também é usada em indústrias de alimentos, medicamentos e cosméticos. No entanto, alguns estudos sugerem um aumento no risco de câncer com o consumo excessivo de chá mate (Cardozo, 2021).

A qualidade e a rastreabilidade dos processos e produtos são essenciais para o desenvolvimento da erva-mate em novos segmentos, garantindo que atenda às especificações sensoriais, físicas, químicas e microbiológicas (Mendes, 2005).

Várias classes de constituintes químicos são encontrados na composição da erva-mate sendo muitos desses benéficos à saúde, como por exemplo: metilxantinas (cafeína, teobromina,

teofilina), polifenóis (ácidos clorogênicos e ácido cafeico), flavonoides (quercetina, rutina e campferol, dentre outros), aminoácidos, minerais (P, Fe e Ca) e vitaminas (C, B1 e B2) (Pagliosa, 2009).

Devido às inúmeras ações no organismo, a erva-mate vem se tornando alvo de estudos. Os derivados da erva-mate possuem diversas propriedades benéficas, como ação hipocolesterolêmica, hepatoprotetora, antioxidante, diurética, digestiva e estimulante do sistema nervoso. Estudos em animais indicam que a erva-mate regula processos relacionados à adipogênese, antioxidantes, inflamação e insulina, mostrando potencial para redução do peso e controle da obesidade (Cardozo, 2021).

A Tabela 3 abaixo apresenta uma lista de compostos identificados na erva-mate associados aos seus benefícios biológicos.

Tabela 3: Atividades Biológicas dos Compostos Presentes na Erva-Mate: Efeitos Terapêuticos e Medicinais.

Compostos	Atividades Biológicas
Cafeína	Anticarcinogênica, antiobesidade, antioxidante, diurética, vasodilatadora
Ácido Clorogênico	Antioxidante, analgésico, antiaterosclerótico, bactericida, antidiabético, antitumoral
Clorofila	Bactericida, anticâncer
Colina	Antidiabética, lipotrópica
Ácido Nicotínico	Hipocolesterolêmica
Ácido Pantotênico	Antialérgico
Rutina	Antioxidante, antitumoral, antiulcera, vasodilatadora
Taninos	Antioxidante, antitumoral
Teobromina	Diurética, estimulante, miorrelaxante
Teofilina	Diurética, estimulante, vasodilatadora
Ácido Ursólico	Analgésico, antioxidante, antitumoral, antialzheimer

Fonte: (Dartora, 2010).

As metilxantinas e os polifenóis são metabólitos secundários com funções ecológicas importantes como defesa contra herbívoros e patógenos, ação alelopática e atração de polinizadores. Dentro da classe das metilxantinas, a cafeína é a mais abundante na natureza, seguida pela teobromina entre outros compostos, encontrados em menores quantidades. Esses

compostos de menor quantidade atuam como intermediários na biossíntese e catabolismo da cafeína (Rossa, 2017).

2.4 METABÓLITOS SECUNDÁRIOS

O metabolismo primário é responsável por funções estruturais, plásticas e de armazenamento de energia, com compostos como lipídios, carboidratos, proteínas e ácidos nucleicos. Já o metabolismo secundário, presente de forma restrita nas plantas, inclui moléculas que evoluíram como estratégias de defesa e adaptação. Ao responderem a estímulos, as plantas modificam rapidamente seus compostos, favorecendo a defesa e o seu desenvolvimento (Rockenbach, 2017).

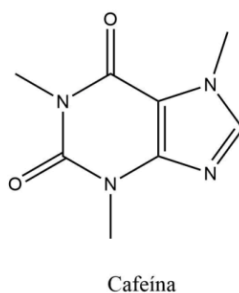
Os alcaloides, como a cafeína, são tóxicos para alguns insetos e conferem sabor amargo. A produção desses compostos e das saponinas ajuda a tornar a planta menos atrativa para herbívoros. Dada a longevidade foliar da erva-mate, é plausível que utilize mecanismos químicos de defesa contra desfolhadores (Gerhardt, 2013).

2.4.1 Cafeína

A cafeína é um alcaloide derivado da xantina (1,3,7-trimetilxantina), amplamente encontrada nas sementes de café, nas folhas de chá verde, no cacau, no guaraná e na erva-mate. É o psicoestimulante mais consumido no mundo e possui atividade biológica e ação farmacológica, com efeitos no sistema nervoso central e no sistema cardiovascular (Toledo, 2017).

Possui a fórmula química $C_8H_{10}N_4O_2$ e sua estrutura molecular é composta por um núcleo de xantina, contendo três grupos metila ligados aos átomos de nitrogênio (De Maria, 2007). A Figura 3 apresenta a fórmula estrutural da cafeína, destacando suas ligações e organização atômica.

Figura 3: Fórmula estrutural da Cafeína



Fonte: Matos, 2024.

Estudos anteriores mostram que a produção de cafeína nas plantas de erva-mate pode variar em função de diversos fatores. Manguze (2019) encontrou que os teores de cafeína aumentaram com a altitude em uma pesquisa sobre café, com um incremento de 650m para 935m. Avelino et al. (2005) também relataram um aumento nos teores de cafeína no café arábica com o aumento da altitude. No entanto, o estudo de Pereira (2021) com ervais nativos em Santa Catarina, entre 790m e 1100m, não encontrou diferenças significativas nos teores de cafeína e teobromina entre diferentes altitudes. Isso pode indicar que a relação entre altitude e produção de cafeína pode variar dependendo de outros fatores, como características do solo e a genética das plantas.

A literatura aborda muitos estudos sobre a biossíntese das metilxantinas, principalmente em plantas como *Coffea* spp. (café), *Theobroma cacao* (cacau) e *Camellia sinensis* (chá), que são as mais estudadas nesse contexto. Embora haja menos estudos sobre a erva-mate (*Ilex paraguariensis*), a via de biossíntese é considerada semelhante, pois envolve os mesmos intermediários e enzimas.

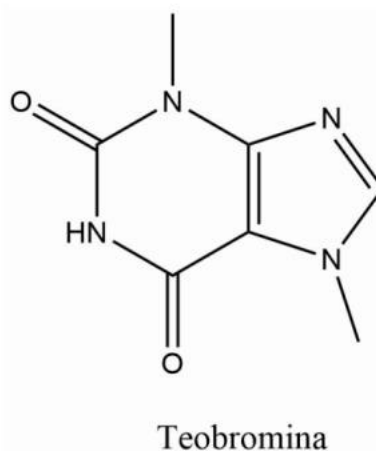
Estudos sobre o efeito da luminosidade na produção de cafeína em erva-mate apontam diferentes resultados. Dartora et al. (2011) encontraram concentrações mais altas de cafeína em folhas expostas ao sol, enquanto Rachwal et al. (2002) relataram menores concentrações de metilxantinas sob maior luminosidade, possivelmente devido ao estresse térmico ou foto-inibição. Da Silva (2012) concluiu que a intensidade da luminosidade não teve efeito significativo nos teores de cafeína e teobromina, sugerindo que outros fatores, como genótipo e condições edafoclimáticas, podem ter maior impacto.

2.4.2 Teobromina

A teobromina (3,7-dimetilxantina) é encontrada principalmente no cacau e no guaraná. Diferente da cafeína, a teobromina age como um vasodilatador melhorando o fluxo sanguíneo, e proporciona uma sensação revitalizante e revigorante (Peres, 2018).

A teobromina, com a fórmula química $C_7H_8N_4O_2$, estruturalmente é semelhante à cafeína, diferenciando-se pela ausência de um grupo metila na posição 1 do anel de xantina. A Figura 4 apresenta a fórmula estrutural da teobromina, destacando suas ligações e organização atômica (Ferreira, 2013).

Figura 4: Fórmula estrutural da Teobromina



Fonte: Matos, 2024

Ambas as substâncias fazem parte da classe das metilxantinas e compartilham vias biossintéticas semelhantes. A teobromina é um precursor direto da cafeína, sendo convertida a esta por meio da ação da enzima cafeína sintase (TBMT). A eficiência dessa conversão pode ser influenciada por fatores ambientais, como temperatura, altitude e luz, o que justifica a variação nos teores desses compostos entre diferentes regiões e condições de cultivo.

A teobromina atua como precursor na via biossintética da cafeína. Em condições favoráveis ao metabolismo da planta, a conversão de teobromina em cafeína pode ocorrer de maneira mais eficiente (Ashihara & Crozier, 2001), esse fenômeno já foi observado em outras espécies, como o café (*Coffea* spp.), onde a conversão metabólica de teobromina para cafeína é influenciada por fatores ambientais como temperatura e altitude (Avelino et al., 2005; Mangueze, 2019).

A literatura mostra estudos com outras espécies vegetais, como *Coffea arabica*, que indicam que altitudes mais elevadas estão associadas a um metabolismo secundário mais ativo, resultando em maior acúmulo de cafeína e menor teor de teobromina (AVELLINO et al., 2005).

Embora as plantas sejam diferentes, o processo de produção desses compostos é similar. A rota biossintética básica é semelhante, mas as diferenças genéticas e ambientais podem causar variações no processo entre as espécies.

Segundo Moreira (2013), as folhas são os principais locais de síntese desses compostos devido à intensa atividade metabólica e ao seu papel na fotossíntese e defesa química. Isso é confirmado por Dartora et al. (2011), que encontraram maiores concentrações de metilxantinas

em folhas expostas à luz solar, sugerindo que a radiação pode estimular a produção dessas substâncias.

As xantinas, como cafeína e teobromina, são produzidas principalmente em folhas, sementes e, em algumas espécies, frutos de plantas. A produção dessas substâncias ocorre por meio de uma via metabólica chamada via das purinas, que também é responsável pela síntese de nucleotídeos. Essa via ocorre nas células vegetais e envolve a transformação de compostos intermediários que resultam em metilxantinas (Ashihara, 2004).

A biossíntese destes compostos na erva-mate ocorre em etapas complexas, utilizando precursores como a xantina. Teobromina sintase e cafeína sintase são as enzimas responsáveis pelas etapas finais de conversão. A cafeína sintase é considerada com atividade bifuncional, a qual catalisa ambos, a conversão de 7-metilxantina à teobromina e deste à cafeína, por meio de metilação. Essas reações acontecem principalmente nas folhas e raízes das plantas (Freitas, 2011).

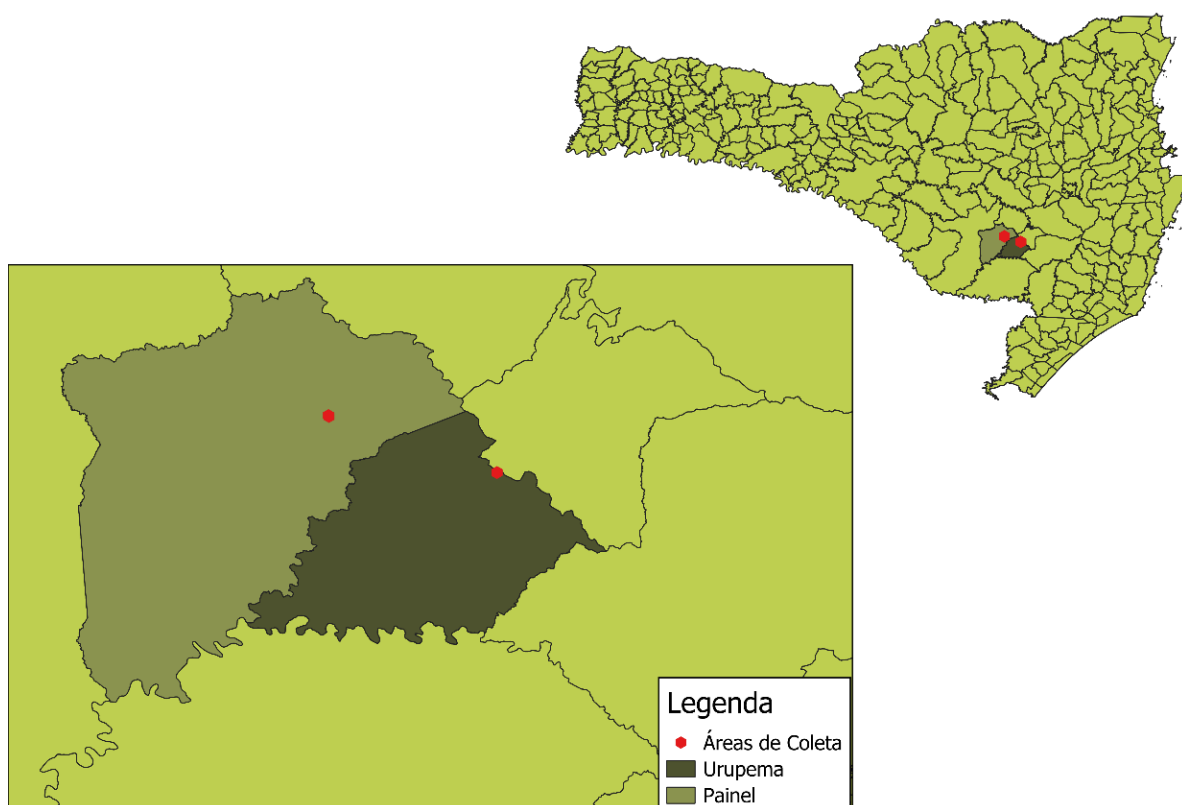
Embora a biossíntese de metilxantinas em plantas siga uma rota bem estabelecida, fatores ambientais (como luminosidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes) e fatores genéticos influenciam a quantidade de cafeína e teobromina produzidas. Algumas plantas podem ter mecanismos regulatórios que controlam a expressão das enzimas-chave envolvidas na síntese dessas substâncias, ajustando sua produção em resposta ao estresse ou à competição com outras plantas (Yanqun, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 LOCAIS DE COLETA

As amostras foram coletadas em áreas de dois municípios de Santa Catarina: Urupema e Painei. Ambos os municípios possuem clima Cbf, caracterizado como temperado úmido, com verões amenos sem estação seca definida, segundo a classificação climática de Köppen (1931). Urupema ($27^{\circ}48'38.9''\text{S}$ $050^{\circ}17'57.2''\text{W}$) que possui uma altitude média de 1460 m, sendo essa a mais alta do estado, possui temperatura média anual de 13°C . Logo, o município de Painei ($27^{\circ}54'52.4''\text{S}$ $049^{\circ}50'20.2''\text{W}$), possui uma altitude média de 1250 m, tendo uma temperatura média de 16°C .

Figura 5: Localização geográfica das áreas de coleta de erva-mate nos municípios treinados (Urupema e Painei, SC)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.2 COLETA DAS AMOSTRAS

3.2.1 Coleta de folhas e galhos

As coletas de folhas e galhos foram realizadas em abril de 2023. Foram coletadas 6 árvores de cada local, sendo destas três localizadas em áreas à pleno sol e três localizadas em áreas de sombreamento. Foram coletadas em média 100 folhas de cada árvore, localizadas no terço médio da copa. Foram coletados galhos com até 10 mm de espessura, limite adotado com base nos padrões da indústria ervateira, conforme descrito por Pagliosa (2009), que recomenda o uso de galhos finos para padronização da matéria-prima.

As amostras foram armazenadas em embalagens plásticas e transportadas ao laboratório, onde foram secas em estufa de ar forçado a 65 °C e em seguida foram moídas e peneiradas em peneira de 250 μ m, e armazenadas até o início das análises.

3.2.2 Coleta de Solo

As coletas de solo foram realizadas em setembro de 2024 e em cada local de coleta, com o auxílio de um trado, foi coletado na profundidade de 0-20cm. No município de Urupema, foram coletados solos de três partes da área, sendo elas: encosta, ombro e topo e para o município de Painel, foram coletados de quatro partes, sendo elas: sopé, encosta, ombro e topo. Ambas as coletas foram realizadas em triplicata.

Após a coleta, os solos foram acondicionados em sacos plásticos identificados, transportados ao laboratório, secos ao ar livre à temperatura ambiente, moídos manualmente e passados em peneira de malha de 2mm e armazenados adequadamente até a realização das análises químicas.

3.3 ANÁLISES

3.3.1 Análises de solo

Para as análises químicas, as amostras de solo dos municípios estudados, foram encaminhadas ao laboratório LabFértil, localizado na cidade de Lages SC, certificado pela Rede Oficial dos Laboratórios de Análises de Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Foram realizadas as análises de pH em Água, índice SMP, P, K, Al, Ca, Mg, CTC pH 7,0 e CTC efetiva, matéria orgânica, saturação de bases, saturação de alumínio, Zn, Cu, Mn, B e S, de acordo com a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

3.3.2 Análise de fósforo e potássio em folhas

A quantificação dos teores de fósforo (P) e potássio (K) nas amostras foliares de erva-mate foi realizada no laboratório de química do CAV – UDESC de Lages – SC, seguindo a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

A determinação do teor de fósforo no solo foi realizada mediante extração com solução de ácido clorídrico (HCl) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e ácido sulfúrico (H_2SO_4) $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$ (relação solo:extrator de 1:10 m/v). Uma massa de solo equivalente a 3 ml (utilizando um cachimbo) foi transferida para um béquer, seguido da adição de 30 ml da solução extratora. A suspensão foi agitada por 5 minutos e, posteriormente, filtrada sob pressão reduzida utilizando um sistema de filtração a vácuo com filtro de membrana de porosidade $0,45 \mu\text{m}$.

Para a quantificação colorimétrica, uma alíquota de 3 ml do filtrado foi transferida para um tubo de ensaio, onde foram adicionados 3 ml da solução de molibdato de amônio tetra hidratado ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 0,38% (m/v) em ácido clorídrico (HCl) $0,87 \text{ mol L}^{-1}$. Em seguida, foram adicionadas 3 gotas de solução de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) a 20% (m/v) como agente redutor. A absorbância da solução resultante foi determinada em espectrofotômetro UV-Visível a um comprimento de onda de 660 nm, utilizando uma curva de calibração previamente estabelecida com padrões de fósforo.

O teor de potássio nas amostras de solo foi determinado por espectrometria de emissão atômica em chama (FEAES) após extração com solução de Mehlich-1 (HCl $0,050 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) na proporção de 1:10 (m v⁻¹), sob agitação por 5 minutos. O extrato foi obtido por filtração à vácuo, e a quantificação do potássio foi realizada por FEAES utilizando uma curva de calibração analítica.

3.3.3 Análise de cafeína e teobromina em folhas e galhos

As análises de folhas e galhos foram realizadas no laboratório de química localizado no CAV – UDESC de Lages – SC e foram quantificados as concentrações de cafeína e teobromina.

A extração foi realizada seguindo a metodologia de Lopes (2007) em triplicata, onde foi pesado 1 g da amostra e adicionado 10 ml de água destilada e 10 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ à uma temperatura de 80°C durante 10 minutos. Em seguida, o extrato foi filtrado e alcalinizado com hidróxido de amônia (NH_4OH) 6 mol L^{-1} até atingir o valor de pH 11,0. Após isso, foi realizado a extração duas vezes com proporção de 10 ml de clorofórmio, e essas frações clorofórmicas foram evaporadas. Os cristais obtidos foram ressolubilizados em fase móvel (mistura de água ultrapura e metanol na proporção 75:25), transferidos para balões volumétricos de 50 mL e utilizados na análise por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE).

A quantificação de cafeína e teobromina foi realizada por (CLAE), utilizando um equipamento da marca Shimadzu (LC-3050C3D). Foi utilizado um sistema composto por uma coluna C-18 (Restek), a uma temperatura de 40 °C e um fluxo de 1ml por minuto. Para fase móvel, foi utilizada a mistura de água ultrapura e metanol em uma proporção de (75:25). Os compostos foram detectados no espectro do ultravioleta em um comprimento de onda de 272 nm e os sinais obtidos foram comparados com os sinais obtidos a partir da curva de calibração.

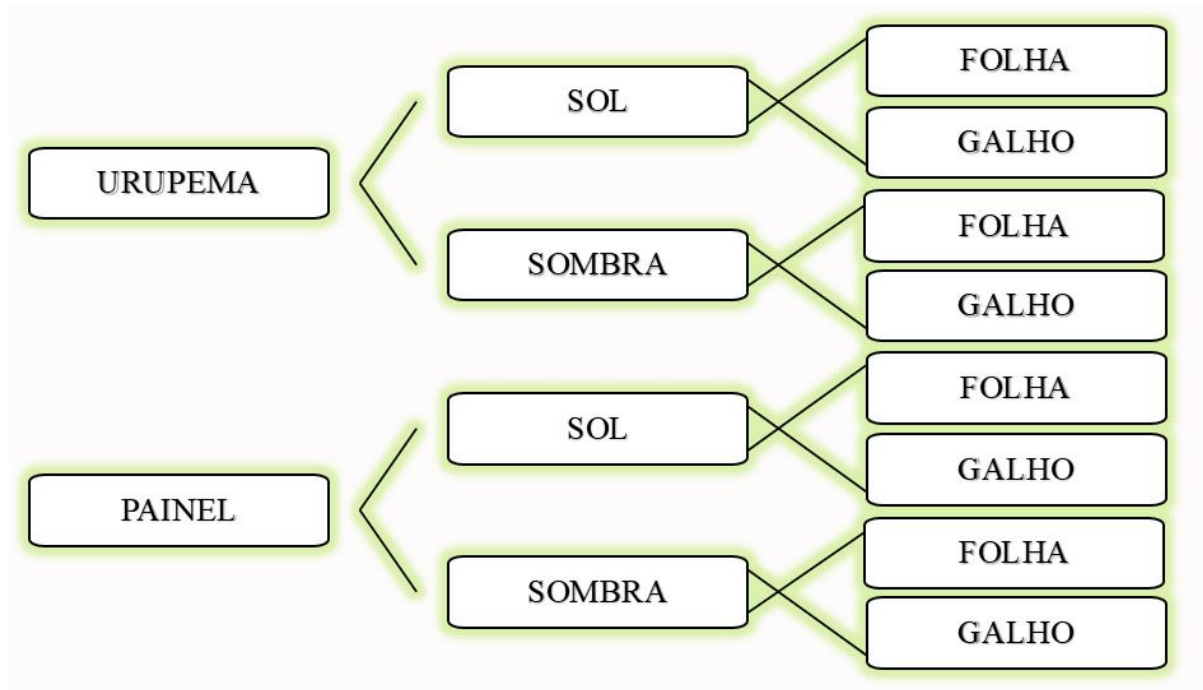
Foi preparada a curva de calibração a partir de soluções padrões de 1 g.L⁻¹ de cafeína e teobromina, e os pontos foram 0, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 µg.L⁻¹ para cafeína e 0, 0,05, 0,10, 0,50, 1,0, 1,5 e 2,0 µg.L⁻¹ para teobromina, ambas diluídas na fase móvel.

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para as análises de solo, o local (Painel e Urupema) foi considerado um fator de análise. Já para as análises de folhas e galhos, as análises estatísticas foram conduzidas utilizando-se um modelo linear hierárquico de efeitos fixos, demonstrado na Figura 6. O modelo linear de efeitos fixos hierárquico, empregado para analisar os dados de folhas e galhos, estrutura a análise em múltiplos níveis, permitindo investigar a influência de diferentes fatores e suas interações na variável resposta. Nesta pesquisa, a hierarquia foi definida em três níveis distintos. No primeiro nível, considerou-se o local de coleta (Painel ou Urupema), buscando identificar possíveis variações nas características das plantas entre essas duas localidades geográficas. O segundo nível da hierarquia incorporou o ambiente de crescimento (Sol ou sombra) dentro de cada local, com o objetivo de avaliar como a exposição à luz solar influencia as variáveis analisadas, independentemente do local. Finalmente, o terceiro nível diferenciou a parte da planta analisada (folha ou galho), permitindo comparar as características entre esses dois tecidos vegetais, controlando os efeitos do local e do ambiente.

As comparações entre as médias nos diferentes níveis foram testadas através dos testes F e t. Precedendo as análises mencionadas foram testadas a normalidade e a homogeneidade de variância pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levenne, respectivamente. Para atenderem-se as pressuposições teóricas dos testes, aplicou-se a transformação raiz quadrada à variável teor de cafeína e raiz cúbica à variável teor de teobromina, de acordo com o método de Box-Cox. Todas as análises foram conduzidas usando-se o software R (R Core Team, 2024). Para todos os testes efetuados foi considerado o nível mínimo de significância de 5%.

Figura 6 – Fluxograma do modelo linear hierárquico de efeitos fixos utilizado nas análises de folhas e galhos de erva-mate. O modelo considera três níveis hierárquicos: o primeiro nível com os locais (Painel e Urupema), o segundo nível com os ambientes (sol e sombra) e o terceiro com as partes da planta (folha e galho).



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

As características químicas do solo estão apresentadas na Tabela 4. Ambos os solos nos dois municípios apresentaram pH ácido, sem diferenças estatisticamente significativas entre si, refletindo a presença de solos ácidos típicos de regiões com altas precipitações e altos teores de material orgânico, como nas áreas serranas. De acordo com o Manual de Calagem e Adubação (2016), um solo é considerado ácido quando o pH em água é inferior a 5,0, o que indica uma saturação com H^+ e maior presença de Al^{3+} . Esse ambiente edáfico é favorável ao desenvolvimento da erva-mate, pois a planta prefere solos de natureza ácida.

Tabela 4: Características Químicas e teor de argila dos Solos coletados em áreas de produção de erva-mate nos municípios de Painei e Urupema

ANÁLISE	UNIDADE	PAINEL	URUPEMA
pH em água	-	4,1 a	4,1 a
Índice SMP	-	4,5 a	4,4 a
Al	cmol/dm ³	1,6 a	0,8 b
Ca		1,6 a	0,8 b
Mg		0,5 a	0,2 b
H+Al		23,5 a	26,0 a
CTC pH 7,0		26,0 a	27,3 a
CTC efetiva		7,5 b	9,0 a
K		0,2 a	0,1 b
Saturação Bases	%	9,4 a	4,8 b
Saturação Al	%	68,2 b	85,3 a
Ca/Mg	-	3,2 a	3,4 a
(Ca+mg)/K	-	11,4 a	11,8 a
Matéria Orgânica	%	6,4 b	12,9 a
Argila	%	24,8 a	18,8 a
P	mg/dm ³	4,8 a	3,0 b
S		18,5 b	27,7 a
B		0,2 a	0,2 a
Cu		7,6 a	2,7 b
Zn		2,5 a	1,8 a
Mn		87,5 a	38,4 b

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma linha não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) representa a capacidade do solo de reter e trocar íons positivos (cátions), sendo uma medida importante da sua fertilidade potencial (CQFS-RS/SC, 2016). Em relação ao alumínio trocável, o solo de Painei apresentou valores significativamente mais altos ($1,64 \text{ cmol/dm}^3$) em comparação ao solo de Urupema ($0,89 \text{ cmol/dm}^3$), o que sugere maior toxicidade potencial associada ao alumínio, característica comum em solos ácidos. A presença elevada de alumínio trocável no solo de Painei é típica de solos ácidos (pH inferior a 5,0), onde o alumínio solúvel se torna mais disponível e pode ser tóxico para as plantas, inibindo o crescimento radicular e limitando a absorção de nutrientes essenciais (Siqueira, 1985; Fageria; Baligar, 2011).

Por outro lado, o menor teor de alumínio no solo de Urupema, apesar do pH semelhante, pode ser explicado por fatores como a maior quantidade de matéria orgânica (12,9% em Urupema contra 6,47% em Painei), que ajuda a complexar o Al, reduzindo sua toxicidade. A matéria orgânica forma complexos organo-Al, diminuindo a solubilidade do alumínio e, consequentemente, sua toxicidade (Tebaldi, 2000).

O Solo de Urupema também apresentou menores concentrações de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) em comparação ao solo de Painei, indicando que os solos de Urupema são mais empobrecidos em nutrientes essenciais. Essa condição de menor disponibilidade de nutrientes pode estar associada a um estímulo na produção de metabólitos secundários, como cafeína e teobromina, possivelmente como uma estratégia adaptativa da planta em resposta ao ambiente com menos recursos (Neto, 2007). Em Painei, com maior disponibilidade desses nutrientes, a planta pode se concentrar mais em processos de crescimento vegetativo e produção de biomassa, alocando proporcionalmente menos recursos para a síntese de compostos secundários (Römhelt; Marschner, 1992; Liu, 2018).

O índice Ca/Mg e (Ca+Mg)/K são similares nos solos de Urupema e Painei, o que pode indicar que, embora os teores individuais de Ca, Mg, e K sejam diferentes, o equilíbrio entre esses nutrientes seja similar nos dois locais.

Embora ambos os solos sejam ácidos, Urupema tem maior H+Al, o que pode aumentar a acidez potencial. No entanto, a matéria orgânica presente no solo de Urupema pode ajudar a mitigar os efeitos da acidez, formando complexos com o alumínio e reduzindo sua toxicidade. Esses complexos reduzem a concentração de alumínio livre na solução do solo, minimizando o impacto tóxico nas raízes e melhorando a disponibilidade de outros nutrientes (Novais; Smyth; Nunes, 2007; Mendonça; Rowell, 2024).

Urupema apresenta uma saturação por bases inferior no solo em comparação com Painei, indicando que, em termos relativos, há menos nutrientes catiônicos básicos disponíveis

para as plantas. O solo de Painei, apesar de ter uma menor quantidade de matéria orgânica, apresenta uma maior saturação de bases, o que pode ser vantajoso para as plantas em termos de disponibilidade de cálcio, magnésio e potássio. Isso pode limitar a nutrição vegetal, pois os cátions essenciais estão em menor concentração no solo de Urupema. A saturação por bases é uma medida da quantidade de CTC ocupada por cátions essenciais, e uma menor saturação pode ser indicativa de solos mais empobrecidos (Fageria; Baligar, 2005; Sanchez, 2018). Em Painei, o solo com maior saturação por bases resulta em maior disponibilidade de nutrientes essenciais como cálcio, magnésio e potássio, favorecendo o crescimento das plantas. Urupema, com menor saturação por bases e maior acidez, apresenta maior dificuldade para fornecer esses nutrientes às plantas, o que pode aumentar a produção de compostos secundários como uma estratégia adaptativa.

A saturação por alumínio em Urupema é muito maior do que em Painei, indicando que uma grande parte da CTC está ocupada por alumínio, o que pode resultar em alta toxicidade para as plantas, especialmente em pH ácido. Em Painei, embora a saturação por alumínio também seja significativa, o valor de 68,23% é mais favorável do que o de Urupema, o que sugere menor toxicidade para as plantas, comparado a Urupema (Siqueira, 1985).

Em Urupema, o solo apresenta uma maior CTC efetiva, impulsionada pelo seu maior teor de matéria orgânica, que naturalmente aumenta a capacidade do solo de reter cátions. Contudo, essa maior capacidade de retenção é, em grande parte, ocupada pelos íons Al^{3+} devido à maior saturação por alumínio e à maior acidez potencial do solo. Essa competição pelos sítios de troca da CTC resulta em uma menor disponibilidade de cátions benéficos e essenciais para a nutrição da erva-mate, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K (EMBRAPA, 2015).

O solo de Urupema apresenta maior teor de matéria orgânica (12,9%), um fato que pode compensar parcialmente a baixa fertilidade química, pois a matéria orgânica melhora a estrutura do solo, capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes. A maior quantidade de matéria orgânica pode mitigar os efeitos da acidez no solo, formando complexos organo-minerais que ajudam a reduzir a toxicidade do alumínio, por exemplo, além de melhorar a capacidade de retenção de cátions (Raij et al., 1997; Fageria, 2009).

A fração argila observada é maior em Painei (24,83%) em comparação a Urupema (18,89%), o que indica uma textura mais fina em Painei. Solos com maior fração de argila tendem a ter uma maior capacidade de retenção de água e de nutrientes, devido à maior superfície de troca iônica oferecida pelas partículas finas de argila (Fageria, 2005).

P e B não diferiram significativamente, e em ambos os municípios aparecem em níveis baixos. Cu, Zn e Mn apresentam maiores valores em Painei do que em Urupema, indicando um

melhor suporte ao solo nos processos fotossintéticos já que esses micronutrientes são importantes para ativação enzimática e síntese de clorofila (Fageria, 2009). S apresentou maiores concentrações em Urupema, que pode ser explicado pelo alto valor de matéria orgânica no solo, que contribui para a liberação de S a medida que vai se decompondo (Fageria, 2005).

A análise das características químicas dos solos nos municípios de Painei e Urupema revela diferenças significativas que influenciam o desenvolvimento da erva-mate. Ambos os solos são ácidos, com pH semelhantes, o que é favorável para o cultivo desta planta, que prefere esse tipo de ambiente. No entanto, as diferenças nos teores de nutrientes e na saturação de bases entre os dois locais têm impactos distintos sobre essa cultura.

Painei apresenta um solo com maior disponibilidade de nutrientes essenciais, como cálcio, magnésio, potássio e fósforo, além de uma saturação de bases mais elevada, o que favorece o crescimento vegetativo das plantas. Em contraste, Urupema, embora também tenha solo ácido, apresenta uma menor disponibilidade de cátions essenciais, com menores concentrações de Ca, Mg e K. A maior acidez potencial e a maior saturação por alumínio tornam o ambiente mais tóxico, o que pode limitar a nutrição das plantas e estimular um maior investimento na produção de metabólitos secundários como uma estratégia adaptativa. A diferença na textura do solo entre os dois municípios também é relevante. Painei apresenta solos com maior fração de argila, o que aumenta a capacidade de retenção de água e nutrientes, favorecendo o desenvolvimento da planta. Em Urupema, a menor fração de argila e a maior quantidade de matéria orgânica ajudam a melhorar a estrutura do solo, mas a menor saturação por bases e a maior acidez ainda representam desafios para a absorção eficiente de nutrientes.

4.2 ANÁLISE DE FÓSFORO E POTASSIO NAS FOLHAS

As amostras coletadas em Painei apresentaram concentrações mais altas de fósforo nas folhas ($120,83 \text{ mg.kg}^{-1}$) em comparação a Urupema ($69,69 \text{ mg.kg}^{-1}$). Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que o solo de Painei apresenta menor teor de alumínio trocável, o que resulta em uma menor acidez efetiva e uma maior saturação por bases. Esses fatores contribuem para aumentar a disponibilidade de fósforo no solo e facilitam sua absorção pelas plantas (CQFS-RS/SC, 2016). Solos com menor concentração de alumínio trocável, como os de Painei, favorecem a maior disponibilidade de fósforo, uma vez que este nutriente tende a formar compostos insolúveis com cátions de alumínio e ferro, cuja solubilidade aumenta em condições

de maior acidez (Raij et al., 1997). A Tabela 5 ilustra essa diferença nas concentrações de fósforo e potássio.

Tabela 5: Concentração de fósforo e potássio disponíveis nas folhas de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema

MUNICÍPIO	K	P
	mg.kg ⁻¹	
PAINEL	4262,7 a	120,8 a
URUPEMA	1955,5 b	69,6 b

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Quanto ao potássio, os teores foram maiores nas amostras do município de Painei (4262,7 mg.kg⁻¹) em comparação as de Urupema (1955,5 mg.kg⁻¹), o que reflete diretamente os teores de potássio no solo. Essa diferença pode ser explicada pela maior saturação por bases observada em Painei, que favorece a retenção de cátions, incluindo o potássio (K). Solos com maior saturação por bases têm maior capacidade de troca catiônica (CTC), o que facilita a absorção de nutrientes pelas plantas, resultando em maiores concentrações de K nas folhas (Raij et al., 1997).

Esse padrão de acúmulo de potássio pode ter implicações na biossíntese de metabólitos secundários, como a cafeína. Estudos anteriores mostraram que a nutrição mineral influencia diretamente a concentração de cafeína nas folhas, como observado por Mazzafera (1999), que destacou a relação entre fertilidade do solo e o conteúdo de cafeína em folhas de café. Em seu estudo, a ausência de K e P induziram a redução de cafeína em folhas de café.

Além disso, os solos de Painei apresentam maior riqueza em cátions básicos, como cálcio, magnésio e potássio, o que favorece o melhor fornecimento desses nutrientes essenciais às plantas. Esse maior aporte nutricional se reflete nas concentrações foliares superiores de potássio, de forma similar ao observado para o fósforo (Marschner, 2012). Assim, a maior disponibilidade de potássio em Painei pode potencialmente estar associada a variações na concentração de cafeína na erva-mate, uma hipótese que merece investigação adicional.

4.3 CAFEÍNA

4.3.1 Painei e Urupema

A concentração média de cafeína nas folhas de erva-mate foi significativamente maior em Urupema (49,6 µg.L⁻¹) em comparação a Painei (6,1 µg.L⁻¹), como mostra a tabela 6. Essa

diferença pode ser explicada por uma combinação de fatores ambientais, climáticos e edáficos. Urupema, com uma altitude média de 1460 m e temperatura média anual de 13°C, apresenta condições mais frias que podem reduzir a taxa de crescimento vegetativo das plantas, mas ao mesmo tempo, favorecer a produção de metabólitos secundários, como a cafeína. A baixa temperatura está associada ao estresse ambiental, o que pode induzir as plantas a investir mais em compostos que atuam na defesa, como a cafeína (Neto, 2007).

Tabela 6: Concentração de cafeína presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema

MUNICÍPIO	Cafeína $\mu\text{g.L}^{-1}$
PAINEL	6,1133 b
URUPEMA	49,6560 a

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Por outro lado, Painei, localizado a uma altitude mais baixa (1250 m) e com temperatura média anual de 16°C, apresenta um clima mais ameno, o que pode promover um maior crescimento vegetativo e, conseqüentemente, reduzir o investimento da planta em metabólitos secundários, como a cafeína. Além disso, a composição do solo, como maior teor de matéria orgânica e menor saturação por bases em Urupema, pode interagir com as condições climáticas, influenciando a disponibilidade de nutrientes essenciais para a planta e afetando a síntese de compostos como a cafeína. O clima mais frio de Urupema, em conjunto com a fertilidade do solo, pode estimular a planta a produzir maior quantidade de cafeína como uma resposta a fatores ambientais adversos.

Diante disso, futuros estudos poderiam investigar de forma mais aprofundada a relação entre os fatores edáficos e a síntese de cafeína, sendo necessário isolar e manipular variáveis específicas para determinar seu impacto direto na biossíntese e acúmulo de metabólitos secundários. Considerar como o aumento da matéria orgânica e a menor saturação por bases influenciam a absorção de nutrientes e o metabolismo secundário da erva-mate, em condições controladas, seria fundamental. A compreensão desses mecanismos causais poderia contribuir para o manejo adequado dos ervais nativos, visando tanto a conservação das populações quanto a otimização da qualidade química das folhas para diferentes usos.

4.3.2 Pleno sol e Sombra

A Tabela 7 apresenta as concentrações de cafeína nas folhas de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema, em ambientes de pleno sol e sombreamento. Em ambos os municípios, observou-se que a exposição ao sol resultou em maiores concentrações de cafeína, confirmando o papel da luminosidade como fator indutor da produção de compostos bioativos. Em Urupema, os teores variaram de 38,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (sombra) para 61,8 $\mu\text{g.L}^{-1}$ (sol), o que representa uma concentração aproximadamente 1,6 vez maior no ambiente ensolarado. Já em Painei, as concentrações foram consideravelmente menores (3,6 $\mu\text{g.L}^{-1}$ na sombra e 9,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ no sol), mas a diferença foi proporcionalmente mais expressiva, com valores mais que 2,5 vezes maiores no ambiente com maior luminosidade. Isso indica um efeito relativo da luminosidade mais acentuado nesse município.

Tabela 7: Concentração de cafeína presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado

MUNICÍPIO	AMBIENTE	$\mu\text{g.L}^{-1}$
PAINEL	Sol	9,2 a
	Sombra	3,6 b
URUPEMA	Sol	61,8 a
	Sombra	38,8 b

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Esse comportamento evidencia que, embora Urupema apresente os maiores valores absolutos de cafeína — possivelmente em decorrência de sua maior altitude, temperatura média anual mais baixa e condições edáficas específicas —, o impacto da luminosidade na biossíntese do composto foi mais proporcionalmente expressivo em Painei. Isso sugere que em locais com menores concentrações basais, o estímulo ambiental pode gerar uma resposta metabólica mais sensível à intensidade luminosa.

A elevação da cafeína sob maior luminosidade está associada ao aumento da fotossíntese, que fornece mais energia metabólica para a planta, favorecendo a produção de compostos secundários com função defensiva, como a cafeína (Marenco, 2014; Wermuth, 2023).

Apesar dos resultados apontarem tendências importantes, é fundamental reconhecer que os dados aqui apresentados devem ser interpretados com cautela. Este estudo se baseou em coletas realizadas em um único período do ano e em um número limitado de indivíduos por

ambiente analisado. Para compreender com mais profundidade as variações nos teores de cafeína, seria necessário ampliar a amostragem, incluindo diferentes épocas e locais dentro dos próprios municípios. Assim, seria possível captar melhor a diversidade de condições ambientais e edáficas que influenciam a produção desses compostos nas plantas.

4.3.3 Folhas e Galhos

Em ambos os municípios, as folhas apresentaram concentrações significativamente mais altas de cafeína em comparação aos galhos, independentemente das condições de sol ou sombra. Esse padrão é esperado, já que as folhas são o principal local de fotossíntese e produção de compostos secundários, como a cafeína. Já os resultados observados nos galhos, que apresentam concentrações mais baixas, sugerem que a produção de cafeína nesta parte é menos intensa, refletindo sua função secundária em relação às folhas, que desempenham um papel central no metabolismo da planta.

A Tabela 8 apresenta as concentrações de cafeína em folhas e galhos, comparando os ambientes de pleno sol e sombreado nos municípios de Painei e Urupema.

Tabela 8: Concentração de cafeína presentes em partes da planta (folha e galho) de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado.

MUNICÍPIO	AMBIENTE	PARTE	$\mu\text{g.L}^{-1}$
PAINEL	Sol	Folha	13,3 a
		Galho	5,9 b
URUPEMA		Folha	97,9 a
		Galho	34,0 b
PAINEL	Sombra	Folha	4,6 a
		Galho	2,7 a
URUPEMA		Folha	79,3 a
		Galho	12,6 b

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Os dados obtidos indicam uma diferença significativa na concentração de cafeína entre as folhas e os galhos, sendo as folhas sempre mais ricas em cafeína, especialmente em Urupema. Este município, que possui uma maior altitude (1460 m) e temperatura média mais baixa (13°C), apresenta concentrações de cafeína nas folhas muito superiores às de Painei (1250 m, 16°C), com valores de 97,9 $\mu\text{g.L}^{-1}$ em Urupema, contra 13,3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ em Painei, quando expostas

ao sol. Esses resultados corroboram com os dados da literatura, abordados anteriormente, em que fatores ambientais como altitude e temperatura, influenciam a produção de compostos secundários como a cafeína, um padrão observado em outros estudos.

Outro aspecto importante que se destaca é o efeito do sombreamento sobre a concentração de cafeína. Para ambos os municípios, as amostras expostas ao sol resultaram em concentrações mais altas, tanto em folhas quanto em galhos. Em Urupema, as folhas sombreadas apresentaram uma redução de $18,57 \mu\text{g.L}^{-1}$ em comparação às expostas ao sol ($97,91 \mu\text{g.L}^{-1}$ contra $79,34 \mu\text{g.L}^{-1}$). Embora em Painei a diferença entre folhas em sol ($13,34 \mu\text{g.L}^{-1}$) e sombra ($4,62 \mu\text{g.L}^{-1}$) seja menor, ainda assim é significativa. Esse padrão pode ser explicado pelo maior processo fotossintético e síntese de compostos bioativos, como a cafeína, sob maior intensidade luminosa, explicado anteriormente.

Além disso, é importante considerar as variações genéticas das plantas, que podem influenciar a resposta à luminosidade e aos fatores climáticos. Assim, os resultados encontrados neste estudo fornecem novas perspectivas sobre os efeitos do ambiente e da parte da planta sobre a produção de cafeína em erva-mate, mas também indicam a necessidade de mais pesquisas para compreender a complexidade dessa interação.

4.4 TEOBROMINA

4.4.1 Painei e Urupema

A Tabela 9 apresenta a concentração média de teobromina nas amostras de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema. Os resultados indicam que, embora a média de teobromina em Painei ($0,6 \mu\text{g.L}^{-1}$) tenha sido numericamente maior do que em Urupema ($\mu\text{g.L}^{-1}$), essa diferença não foi estatisticamente significativa. Portanto, com base na análise realizada, não se pode afirmar que haja uma diferença real no teor médio de teobromina entre as duas localidades.

Tabela 9: Concentração de teobromina presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema

MUNICÍPIO	$\mu\text{g.L}^{-1}$
PAINEL	0,6 a
URUPEMA	0,2 a

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Contudo, a tendência observada sugere uma possível variação na distribuição da teobromina entre as duas localidades, que pode estar associada a fatores como as condições climáticas e o metabolismo das plantas, enquanto a menor concentração das amostras em Urupema pode refletir um aumento na conversão de teobromina em cafeína, já que a teobromina é um precursor da cafeína na via biossintética. Estudos anteriores indicam que essa conversão pode ser mais eficiente sob condições ambientais que favoreçam o metabolismo da planta, como é o caso das temperaturas mais frias e da maior altitude observadas em Urupema (Moreira, 2013).

Além disso, a química do solo pode desempenhar um papel nesse processo, influenciando indiretamente a regulação metabólica da planta. Fatores como o maior teor de matéria orgânica e a menor saturação por bases no solo de Urupema podem afetar a disponibilidade de nutrientes essenciais, modulando rotas metabólicas envolvidas na síntese de alcaloides. Embora este estudo não tenha avaliado diretamente a influência da química do solo sobre a produção de teobromina, investigações futuras poderiam explorar essa relação, analisando como variações nos atributos edáficos impactam a conversão entre esses compostos e, conseqüentemente, a composição química da erva-mate.

Outro fator que pode contribuir para as diferenças observadas é a idade das plantas. Estudos indicam que o estágio de desenvolvimento da planta influencia seu metabolismo secundário, podendo alterar os teores de teobromina e cafeína. Assim, variações não controladas na idade dos indivíduos amostrados podem ter influenciado os resultados, representando uma limitação metodológica a ser considerada em futuras investigações (Neto, 2007).

A concentração de teobromina pode variar significativamente entre diferentes genótipos de erva-mate, uma vez que populações naturais da planta apresentam alta diversidade genética, o que pode explicar variações nos perfis químicos entre localidades (Gnoatto et al., 2007).

4.4.2 Pleno sol e Sombra

A teobromina é um precursor direto na via Biosintética da cafeína, sendo convertida por meio da ação de metiltransferases específicas. Esse processo pode ser influenciado por fatores ambientais, como temperatura, altitude e intensidade luminosa, que afetam a regulação enzimática e o metabolismo secundário das plantas. Em condições ambientais mais adversas, como temperaturas mais baixas e maior exposição à radiação UV, a produção de cafeína pode ser intensificada como um mecanismo de defesa, reduzindo a concentração de teobromina disponível.

Os resultados da tabela 10 demonstram que a concentração média de teobromina nas amostras em Painei (1,0 $\mu\text{g.L}^{-1}$ a pleno sol e 0,3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à sombra) são superiores aos observados nas amostras de Urupema (0,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ a pleno sol e 0,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à sombra). Essa diferença sugere que, em Urupema, ocorre uma conversão mais eficiente de teobromina em cafeína, visto que este município apresentou as maiores concentrações de cafeína entre as áreas estudadas.

Tabela 10: Concentração de teobromina presentes em erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado

MUNICÍPIO	AMBIENTE	$\mu\text{g.L}^{-1}$
PAINEI	Sol	1,0 a
	Sombra	0,3 a
URUPEMA	Sol	0,2 a
	Sombra	0,2 a

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

Os dados sugerem que a menor temperatura média anual de Urupema (13°C) e sua maior altitude (1460 m) podem estar relacionadas a uma possível indução de mecanismos bioquímicos que favoreceriam a conversão de teobromina em cafeína. Isso ocorre porque a cafeína, além de atuar como um aleloquímico (defesa contra herbívoros e patógenos), também pode desempenhar um papel na adaptação ao estresse ambiental (Yoo, 2023).

Outro ponto relevante é que a intensidade luminosa parece não ter impactado significativamente a concentração de teobromina, já que não houve variações estatisticamente significativas entre sol e sombra dentro de cada localidade. Esse achado pode estar relacionado a uma menor sensibilidade da teobromina à radiação solar em comparação com a cafeína, ou a um controle enzimático que mantém a conversão do composto relativamente estável independentemente da luminosidade disponível.

Dessa forma, os resultados sugerem uma possível associação entre a menor temperatura e maior altitude de Urupema e as concentrações de cafeína e teobromina. Essas condições ambientais poderiam estar relacionadas a uma maior acumulação de cafeína e, possivelmente, a uma menor presença de teobromina. No entanto, os mecanismos bioquímicos envolvidos nessas observações, incluindo a regulação da conversão de teobromina, requerem investigações futuras mais aprofundadas para serem elucidados.

4.4.3 Folhas e Galhos

As folhas geralmente acumulam mais compostos bioativos como a cafeína e a teobromina devido à sua função primária na fotossíntese e ao metabolismo secundário. E nas folhas de erva-mate são locais de maior atividade metabólica, o que favorece o acúmulo desses compostos (Moreira, 2013).

Tabela 11: Concentração de teobromina presentes em partes da planta (folha e galho) de erva-mate coletadas nos municípios de Painei e Urupema comparando o ambiente em pleno sol e sombreado.

MUNICÍPIO	AMBIENTE	PARTE	µg.L ⁻¹
PAINEL	Sol	Folha	0,6 a
		Galho	0,2 a
URUPEMA		Folha	0,2 a
		Galho	0,1 a
PAINEL	Sombra	Folha	0,6 a
		Galho	0,1 a
URUPEMA		Folha	0,2 a
		Galho	0,1 a

Fonte: Elaborada pela autora, 2025. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não se diferem pelos testes F e t, respectivamente, com o nível mínimo de significância de 5%.

A Tabela 11 apresenta os teores médios de teobromina ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nas amostras de Painei e Urupema. Em Painei, as folhas apresentaram valores numericamente superiores ($0,6 \mu\text{g.L}^{-1}$) aos dos galhos ($0,2 \mu\text{g.L}^{-1}$) sob ambas as condições de luz. Uma tendência semelhante foi observada em Urupema, com maiores teores nas folhas ($0,2 \mu\text{g.L}^{-1}$) em relação aos galhos ($0,1 \mu\text{g.L}^{-1}$), embora a magnitude dessa diferença fosse menor do que em Painei. No entanto, a análise estatística indicou que essas variações nos teores de teobromina entre folhas e galhos não foram significativas em nenhum dos municípios.

Como citado anteriormente, a teobromina atua como precursor na rota biosintética da cafeína o que pode justificar as menores concentrações de teobromina em Urupema, onde as concentrações de cafeína foram mais elevadas.

No entanto, a variação entre as amostras de Painei e Urupema sugere que fatores ambientais, como temperatura e altitude, desempenham um papel crucial na regulação desses metabólitos. Segundo Avelino et al. (2005), em plantas de café cultivadas em altitudes elevadas,

há um aumento nos teores de cafeína e uma redução nos teores de teobromina, o que pode estar relacionado a um metabolismo mais ativo para conversão da teobromina em cafeína sob temperaturas mais baixas. Esse padrão é semelhante ao encontrado no presente estudo, onde a menor temperatura média em Urupema pode ter favorecido a conversão da teobromina em cafeína, resultando em menores concentrações desse precursor.

Além disso, a menor diferença entre as amostras de folhas e galhos em Urupema pode indicar que as condições ambientais desse município influenciam a distribuição e metabolismo das metilxantinas na planta. Trabalhos como o de Rachwal et al. (2002) sugerem que a resposta da erva-mate ao ambiente pode variar conforme o genótipo da planta e o regime de sombreamento. No presente estudo, embora as diferenças entre folhas e galhos não tenham sido estatisticamente significativas, a tendência de maior acúmulo de teobromina nas folhas reforça a ideia de que a conversão para cafeína ocorre principalmente nessa parte da planta.

Dessa forma, a combinação de fatores ambientais (altitude, temperatura e luminosidade) e as características químicas do solo parecem desempenhar um papel fundamental na modulação da concentração de cafeína e teobromina em ervas nativas. Os dados indicam que plantas em altitudes mais elevadas e temperaturas mais baixas priorizam a conversão de teobromina em cafeína, enquanto em locais de menor altitude essa conversão pode ser menos eficiente. Além disso, a disponibilidade de nutrientes pode atuar como um fator complementar, influenciando a capacidade metabólica da planta de sintetizar e acumular esses compostos.

A análise das características químicas dos solos nos municípios de Painei e Urupema revela diferenças significativas que influenciam o desenvolvimento da erva-mate e, possivelmente, a síntese de metabólitos secundários como a cafeína e a teobromina. Ambos os solos são ácidos, com pH semelhantes, condição favorável ao cultivo da erva-mate, uma planta adaptada a ambientes de baixa acidez. No entanto, as diferenças na disponibilidade de nutrientes e na composição química entre os dois locais afetam a fisiologia da planta, influenciando seu metabolismo secundário.

Painei apresenta um solo com maior disponibilidade de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P), bem como uma maior saturação por bases, fatores que favorecem um crescimento vegetativo mais vigoroso. Em solos mais ricos em nutrientes, as plantas tendem a direcionar mais energia para processos de crescimento e desenvolvimento da biomassa, resultando em uma menor alocação de recursos para a síntese de metabólitos secundários (Römheld & Marschner, 1992; Liu, 2018). Isso pode justificar teores mais baixos de cafeína e teobromina nas plantas de Painei em comparação com Urupema, onde a disponibilidade

limitada de nutrientes pode estimular a produção desses compostos como mecanismo de defesa e adaptação.

Em contraste, Urupema apresenta solos com menor disponibilidade de cátions essenciais (Ca, Mg e K), maior acidez potencial (H+Al) e elevada saturação por alumínio, o que pode dificultar a absorção de nutrientes essenciais e induzir um estresse nutricional nas plantas. Em resposta a essa condição adversa, as plantas podem aumentar a síntese de metabólitos secundários como forma de adaptação ao estresse ambiental (Chaves & Escobar, 2020). Estudos sugerem que condições de menor fertilidade do solo estão associadas a maiores concentrações de alcaloides, pois a planta direciona recursos para a defesa química em vez de priorizar o crescimento vegetativo (Neto, 2007; Fageria & Baligar, 2005).

A maior quantidade de matéria orgânica observada em Urupema pode desempenhar um papel na modulação da disponibilidade de alumínio, reduzindo sua toxicidade através da formação de complexos organo-Al. No entanto, a menor disponibilidade de nutrientes essenciais pode resultar em um aumento da pressão seletiva para a produção de compostos como a cafeína e a teobromina, que atuam como mecanismos de defesa contra herbívoros e estresses ambientais (Ashihara & Crozier, 2001). Assim, a maior produção desses compostos em Urupema pode estar relacionada a um ambiente edáfico nutricionalmente menos favorável, reforçando a hipótese de que a disponibilidade de nutrientes influencia a síntese de metabólitos secundários na erva-mate.

A diferença na textura do solo entre os dois municípios também é relevante. Painei apresenta solos com maior fração de argila (24,8%), o que aumenta a capacidade de retenção de água e nutrientes, favorecendo a disponibilidade de elementos essenciais para as plantas. Em Urupema, a menor fração de argila (18,8%) e a maior matéria orgânica podem melhorar a estrutura do solo, mas a menor saturação por bases e a maior acidez continuam representando desafios para a absorção eficiente de nutrientes, podendo reforçar a produção de alcaloides como resposta fisiológica.

Em conjunto, os fatores climáticos e edáficos em Painei favorecem um ambiente de crescimento vegetativo robusto, enquanto as condições mais limitantes de Urupema promovem uma maior alocação de recursos para a síntese de compostos secundários. Isso evidencia a importância das interações entre clima, solo e metabolismo vegetal na adaptação da erva-mate e na diferenciação das estratégias fisiológicas das plantas em diferentes locais.

Esses resultados são importantes para a compreensão da variabilidade química da erva-mate em diferentes condições ambientais e podem contribuir para estratégias de manejo e melhoramento da cultura visando à produção de compostos bioativos. Estudos futuros poderão

aprofundar essa análise, avaliando a influência sazonal e genética na síntese de metilxantinas, bem como a interação de outros fatores edafoclimáticos na composição química da erva-mate.

CONCLUSÕES

Os dados analisados indicam que as folhas da erva-mate apresentam concentrações mais elevadas de cafeína e teobromina em comparação aos galhos. Essa diferença ocorre porque as folhas são os principais locais de fotossíntese e metabolismo secundário, processos que favorecem a produção desses compostos. Essa tendência foi observada nas amostras dos dois municípios avaliados.

Ao considerar os ambientes de cultivo – sombreado e pleno sol –, verifica-se que as diferenças nas concentrações de cafeína e teobromina podem variar de acordo com o composto e o local de cultivo. Para a cafeína, ambos os municípios apresentaram maiores concentrações em plantas cultivadas a pleno sol em relação às sombreadas. No caso da teobromina, não houve um padrão claro: em Painei, as concentrações nas folhas foram ligeiramente maiores no sol do que na sombra, enquanto em Urupema as diferenças entre os ambientes foram pequenas e estatisticamente não significativas.

As amostras dos dois municípios (Urupema e Painei) também apresentaram diferenças significativas nas concentrações de cafeína e teobromina. Urupema exibiu concentrações mais altas de cafeína em comparação a Painei, tanto em ambientes ensolarados quanto sombreados. Para a teobromina, embora as concentrações tenham sido menores do que os de cafeína em ambos os locais, Painei apresentou valores ligeiramente mais altos em plantas cultivadas a pleno sol, quando comparado a Urupema.

A comparação das características químicas dos solos dos dois municípios revelou que as condições edáficas influenciam a alocação de recursos das plantas. A maior disponibilidade de nutrientes em Painei favoreceu o crescimento vegetativo, o que pode ter limitado a produção de cafeína e teobromina. Por outro lado, em Urupema, as condições mais desafiadoras de solo parecem ter estimulado a planta a priorizar a síntese de metabólitos secundários.

Em conjunto, os fatores climáticos e edáficos em Painei favorecem um ambiente de crescimento vegetativo robusto, enquanto as condições de Urupema, mais desafiadoras, promovem a produção de compostos secundários. Isso evidencia a importância das interações entre clima, solo e ambiente na adaptação da erva-mate e na diferenciação das estratégias fisiológicas das plantas em diferentes locais.

A interação entre fatores climáticos e edáficos mostra-se crucial para a adaptação das plantas e para a diferenciação das suas estratégias fisiológicas. Estes achados ressaltam a importância de considerar as condições ambientais específicas na busca por otimizar a produção de compostos bioativos, sugerindo que manejos adequados e a seleção de genótipos adaptados

podem melhorar a qualidade da erva-mate em diferentes contextos. Estudos futuros, que envolvam aspectos sazonais e genéticos, podem expandir o conhecimento sobre as interações complexas entre solo, clima e metabolismo da planta.

REFERÊNCIAS

- ACR (Associação catarinense de empresas florestais). Disponível em: <<https://acr.org.br/>> Acesso em 23 de setembro de 2024.
- ANTONIAZZI, M.S. et al. **Análise da cultura da erva-mate como alternativa social, econômica e ambiental para comunidades rurais.** Revista Extensão em Foco, nº 15, Jan/ Jul, p.108 – 119, 2018.
- ASHIHARA, HIROSHI & SUZUKI, TAKEO. (2004). Distribution and biosynthesis of caffeine in plants. *Frontiers in Bioscience*. 9. 10.2741/1367.
- AVELINO, J. et al. Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, p. 1869-1876, 2005. DOI: .< <https://doi.org/10.1002/jsfa.2188>>.
- CARDOZO, A.G.L. EL AL. **Erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. – hil.): uma revisão abrangente sobre composição química, benefícios à saúde e recentes avanços.** Research, Society and Development, v. 10, n. 11, e590101120036, 2021 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.20036>>.
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, p. 455-466
- COGOI, Laura et al. Nutritional and phytochemical study of *Ilex paraguariensis* fruits. **Journal of Chemistry**, v. 2013, n. 1, p. 750623, 2013.
- CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2016) Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 376p.
- DA COSTA, E.S. et al. Erva-mate: Ultrapassando fronteiras. **Revista interdisciplinar em desenvolvimento sustentável.** Ano 01, n. 01, jan./jun. 2023. ISSN: 2965-3320
- DA CROCE, D. M.; FLOSS, P. A. Cultura da erva-mate no Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 1999. 81p.
- DA SILVA, C.H.B. **Influência da idade das folhas e da luminosidade nos teores de metilxantinas, ácido clorogênico, fenólicos totais e na atividade de capacitação de radicais livres de extratos aquosos de *Ilex paraguariensis* A. St Hilaire.** 92f. Dissertação (Mestrado). Curso de farmácia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- DARTORA, N. **Avaliação dos polissacarídeos e metabólitos secundários das folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em diferentes estados fisiológicos e de processamento.** 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências – Bioquímica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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, p.453–1461, 2011.

DE MARIA C.A.B. et al. Cafeína: revisão sobre métodos de análise. **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 1, 99-105, 2007

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Nutrient management for improving crop quality. **Advances in Agronomy**, v. 86, p. 59-98, 2005.

FAGERIA, N. K. The use of nutrients in crop plants. Boca Raton: **CRC Press**, 2009.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. Growth and mineral nutrition of field crops. 3. ed. Boca Raton: **CRC Press**, 2011.

FERREIRA, A.S. **Validação da Determinação de Teobromina em amostras de cacau e seus derivados por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC)**. 94f. Dissertação (Mestrado) – Curso de tecnologia e segurança alimentar, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

FREITAS, G.B.L. et al. **Erva-mate, muito mais que uma tradição, um verdadeiro potencial terapêutico**. Revista Eletrônica de Farmácia Vol. VIII (3), 101 - 113, 2011.

GELSLEICHTER, S.D. et al. **Diagnose nutricional e índices fotossintéticos de erva-mate sob diferentes níveis de adubação com zinco**. Nativa, Sinop, v. 9, n. 5, p. 494-499, 2021

GERHARDT, M. **História ambiental da erva-mate**. 2013. 290f. Tese (Doutorado) – Curso de história cultural, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2013.

GNOATTO, S.C.B. et al. Influência do método de extração nos teores de metilxantinas em erva-mate (*Ilex paraguariensis* a. St.-hil. aquifoliaceae). **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 2, 304-307, 2007.

GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis; SANTIN, Delmar; BRASILEIRO, Bruno Portela. Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1345-1367, 2022.

GUIA PRÁTICO PARA INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE SOLOS / LAFAYETTE FRANCO SOBRAL ... [et al.] – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 13 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 206). Disponível em: www.bdpa.cnptia.embrapa.br

IBGE. Censo agropecuário. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuaria.html> Acesso em 21 jun. 2024.

IBGE. PAM – Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/erva-mate-cultivo/br> Acesso em: 21 jun. 2024.

KÖPPEN, W. 1931. Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica.

LOPES, M.R.S. et al. Determinação por HPLC de cafeína e teobromina em folhas jovens e velhas de *Ilex paraguariensis*. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 954-956, jul. 2007.

LIU, L. et al. Effects of mineral nutrition on the accumulation of bioactive secondary metabolites in medicinal plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 5, p. 669-684, 2018.

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

MANGUEZE, Adilson Valério de Jesus. **Influência da altitude e do sombreamento na qualidade física e química do café (*Coffea arabica* L.)**. 101f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Tecnologias de Produção e Transformação Agro-industrial, Universidade de Lisboa, Juri, 2019.

MARENCO, R.A. et al. Fisiologia de espécies florestais da Amazonia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Fisiologia e Morfologia Vegetal**. Rev. Ceres 61 (suppl) • Dez 2014 • <https://doi.org/10.1590/0034-737x201461000004>

MATOS, D.D.F. et al. Extração, quantificação e detecção da cafeína em alimentos como estratégias de ensino de ciências. **Diversitas Journal**, v. 9, n. 2, 2024.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 3. ed. London: **Academic Press**, 2012.

MAZZAFERA, Paulo. Mineral nutrition and caffeine content in coffee leaves. **Bragantia**, v. 58, p. 387-391, 1999.

MAZUCHOWSKI, J. Z. Manual da erva-mate (*Ilexparaguariensis* St. Hill). 2. Ed. Curitiba, PR: EMATER, 1991. 104p

MAZUCHOWSKI, Jorge Zbigniew; SILVA, Eduardo Teixeira da; MACCARI JUNIOR, Agenor. Efeito da luminosidade e da adição de nitrogênio no crescimento de plantas de *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Revista Árvore**, v. 31, p. 619-627, 2007.

MENDES, R.M.O. **Caracterização e avaliação da erva-mate (*ilex paraguariensis* St. Hil.), beneficiada no estado de Santa Catarina**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

MENDONÇA, E. S.; ROWELL, D. L. Effect of organic matter on aluminium toxicity in acidic soils. **Plant and Soil**, v. 171, n. 2, p. 287-291, 1994.

MOREIRA, I.M.L. **Cafeína: biossíntese, propriedades, aplicações e quantificação**. 54f. Monografia (Graduação), Curso de Química Tecnológica. Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NETO L.G. et al. Plantas medicinais: fatores de influência no conteúdo de metabólitos secundários. **Quim. Nova**, Vol. 30, No. 2, 374-381, 2007.

NOGUEIRA, R.C. Prognóstico agropecuário: erva-mate. Departamento de economia rural – DERAL. Vol 13 N. 39 – 2021.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. *Viçosa*, MG: UFV, 2007.

NUNES, Graciele Lorenzoni; DE MENEZES, Cristiano Ragagnin. Microencapsulação por spray drying dos compostos bioativos do extrato aquoso de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) crioconcentrado. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 5, p. 18-29, 2015.

PAGLIOSA, C.M. **Caracterização química do resíduo de ervais e folhas “in natura” de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.)**. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PEREIRA, R.G. **Características morfológicas e teores de cafeína e teobromina entre ervais nativos sombreados e a pleno sol**. 64f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2021.

PERES, L.G. et al. Teobromina, substância encontrada no cacau. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos** - Ano I (2018), volume I, n.3 (extra), ISSN: 2595-1661.

PIRES, D.A.C.K. **A erva-mate no planalto norte catarinense: Os compostos bioativos como variável na determinação das especificidades necessárias ao reconhecimento como indicação geográfica**. DRd – Desenvolvimento Regional em debate. v. 6, n. 2, ed. esp., p. 207-227, jul. 2016.

SANCHEZ, P. A. Properties and management of soils in the tropics. 2. ed. Boca Raton: **CRC Press**, 2018.

SCHUBERT, A.; ZANIN, F. F.; PEREIRA, D. F.; ATHAYDE, M. L. Annual variations of methylxanthines in *Ilex paraguariensis* A. St. Hil (Mate) samples in Ijuí and Santa Maria, State of Rio Grande Do Sul. **Química Nova**, v. 29, p.1233-1236, 2006.

SIQUEIRA, J. O. Toxicidade de alumínio em plantas: aspectos fisiológicos e agrônômicos. Lavras, MG: UFLA, 1985.

RACHWAL, M. F. G. et al. **Influência da luminosidade sobre a produção de massa foliar e teores de macronutrientes, fenóis totais, cafeína e teobromina em folhas de erva-mate**. Colombo: EMBRAPA CNP Florestas, 2002. 5 p.

R CORE TEAM (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Mineral nutrition of plants: from soil to plant. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 42, p. 421-451, 1991.

ROSSA, U.B. et al. **Influência da luminosidade e fertilizantes nos teores de metilxantinas e compostos fenólicos em folhas de erva-mate**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1365-1374, out.-dez., 2017.

ROCKENBACH, A.P. et al. Interferência entre plantas daninhas e a cultura: alterações no metabolismo secundário. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.17, n.1, p.59-70, jan./mar. 2018 DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v17i1.527>.

TEBALDI, F.L.H. et al. Composição Mineral das Pastagens das Regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. 3. Matéria Orgânica, Alumínio e pH dos Solos. **Rev. bras. zootec.**, 29(2):382-386, 2000.

TEDESCO J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TREVISAN, L. Produção de erva-mate, círculos de cooperação e os usos do território no estado do paraná. **Revista geografar**, v. 18, n. 1, p. 8-23, 2023.

VAN RAIJ, B. et al. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas (IAC), 1997.

VIEIRA, M. A. et al. Análise de compostos fenólicos, metilxantinas, tanino e atividade antioxidante de resíduo do processamento da erva-mate: uma nova fonte potencial de antioxidantes. In: **International Workshop–Advances In Cleaner Production**. 2009. p. 1-11.

WERMUTH, D. **Determinação de compostos bioativos, atividade antioxidante e microbiológica em extratos de *Conyza bonariensis* e teste de toxicidade frente *Plutella xylostella***. Dissertação (Mestrado) – curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2023.

YANQUN L.I. et al. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants, **Plant Physiology and Biochemistry**, Volume 148,2020, Pages 80-89, ISSN 0981-9428, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006>.

YOO, Y. et al. Cafeína produzida em plantas de arroz fornece tolerância ao estresse por déficit hídrico. **Antioxidants** , v. 12, n. 11, p. 1984, 2023.

ANEXO A – CROMATOGRAMA DAS ANÁLISES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA
REALIZADAS NAS FOLHAS DE ERVA-MATE

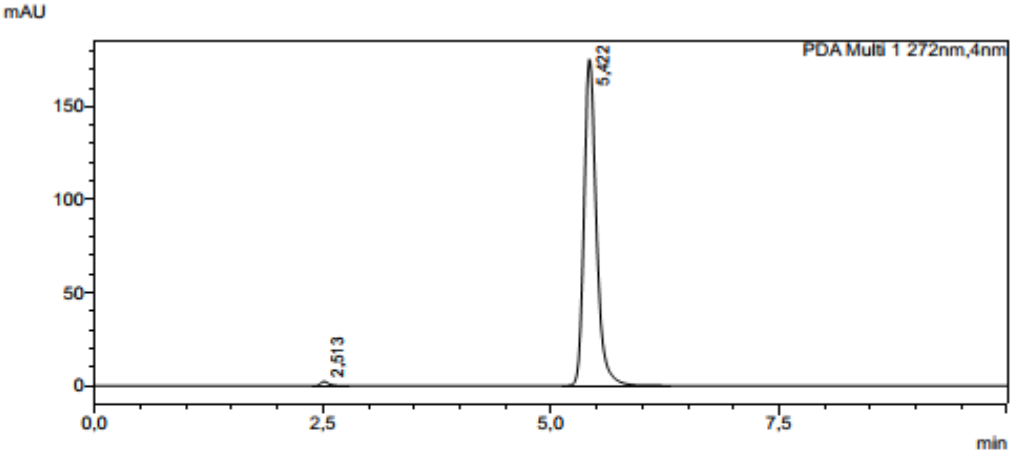
20/05/2024 16:32:24 Page 1 / 1

SHIMADZU LabSolutions Analysis Report

<Sample Information>

Sample Name : P1
Sample ID : 20-05-24
Data Filename : P1_20-05-24_001.lcd
Method Filename : Met_Quant_17-05-24.lcm
Batch Filename : Sequencia_P e G.lcb
Vial # : 1-1
Injection Volume : 10 uL
Date Acquired : 20/05/2024 10:25:25
Date Processed : 20/05/2024 10:36:58
Sample Type : Unknown
Acquired by : User
Processed by : User

<Chromatogram>



<Peak Table>

PDA.Ch1 272nm						
Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Name
1	2,513	13716	2241	0,607	ug/L	Teobromina
2	5,422	1653953	175435	60,570	ug/L	Cafeína
Total		1667669	177676			

Detection Limit	Quantitative Limit
0,02	0,06
0,03	0,08

ANEXO B - CROMATOGRAMA DAS ANÁLISES DE CAFEÍNA E TEOBROMINA
REALIZADAS NOS GALHOS DE ERVA-MATE

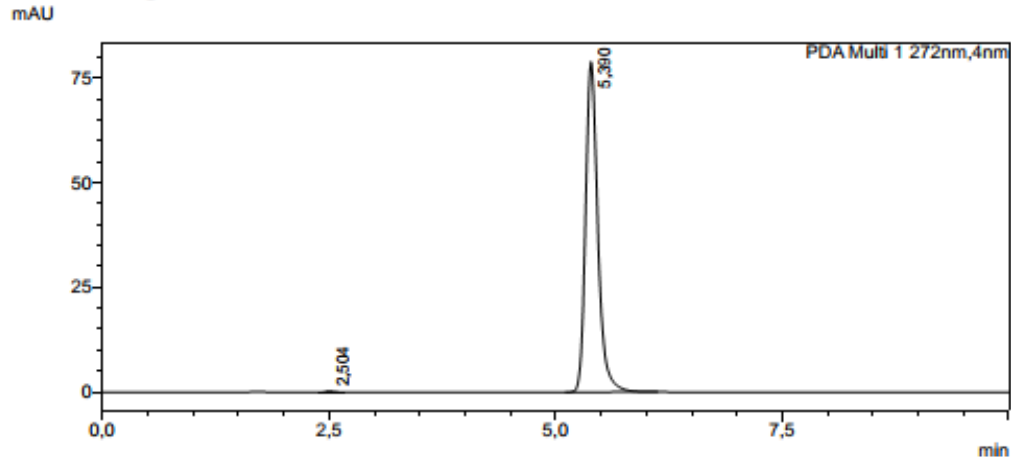
20/05/2024 16:26:06 Page 1 / 1

SHIMADZU LabSolutions Analysis Report

<Sample Information>

Sample Name : G1
Sample ID : 20-05-24
Data Filename : G1_20-05-24_007.lcd
Method Filename : Met_Quant_17-05-24.lcm
Batch Filename : Sequencia_P e G.lcb
Vial # : 1-7
Injection Volume : 10 uL
Date Acquired : 20/05/2024 11:27:32
Date Processed : 20/05/2024 13:43:57
Sample Type : Unknown
Acquired by : User
Processed by : User

<Chromatogram>



<Peak Table>

PDA Ch1 272nm						
Peak#	Ret. Time	Area	Height	Conc.	Unit	Name
1	2,504	1440	244	0,069	ug/L	Teobromina
2	5,390	742736	78932	28,130	ug/L	Cafeina
Total		744177	79177			

Detection Limit	Quantitative Limit
0,02	0,05
0,02	0,06