

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JEIZI KELLI CERUTTI CANDEU

QUALIDADE FITOQUÍMICA DA ERVA-MATE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA E CULTIVARES EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO

CURITIBA

2026

JEIZI KELLI CERUTTI CANDEU

QUALIDADE FITOQUÍMICA DA ERVA-MATE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA E CULTIVARES EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Co-orientadora: Dra. Marcia Toffani Simão Soares
Co-orientador: Prof. Dr. Cícero Deschamps

CURITIBA

2026

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Candeu, Jeizi Kelli Cerutti

Qualidade fitoquímica da erva-mate em função da adubação nitrogenada e cultivares em diferentes sistemas de produção / Jeizi Kelli Cerutti Candeu. – Curitiba, 2026.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Coorientadores: Dra. Marcia Toffani Simão Soares, Prof. Dr. Cícero Deschamps

1. Erva-mate. 2. Plantas - Nutrição. 3. Composto fenólico. 4. Plantas cultivares. I. Pauletti, Volnei. II. Soares, Marcia Toffani Simão. III. Deschamps, Cícero. IV. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. V. Título.

Bibliotecária: Elizabeth de Almeida Licke da Luz CRB-9/1434



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JEIZI KELLI CERUTTI CANDEU**, intitulada: **QUALIDADE FITOQUÍMICA DA ERVA-MATE EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E CULTIVARES EM DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. VOLNEI PAULETTI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Fevereiro de 2026.

Assinatura Eletrônica

14/02/2026 09:35:25.0

VOLNEI PAULETTI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

13/02/2026 17:42:13.0

ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

13/02/2026 17:21:38.0

DELMAR SANTIN

Avaliador Externo (AUTÔNOMO)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria ao longo de toda essa caminhada.

À minha família, base de tudo. Ao meu marido, Silvio Cesar Candeu, meu alicerce, pelo apoio incondicional, pela paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada. À minha filha, Sarah, que, mesmo sem compreender plenamente, sacrificou muitos momentos de lazer e parquinhos para que a mamãe pudesse estudar, seu amor foi minha maior motivação diária.

À minha sogra, Zilda, e à minha mãe, Isolete, que cuidaram do meu bem mais precioso na minha ausência, permitindo que eu seguisse com tranquilidade e dedicação aos estudos. Sem esse apoio, este trabalho não teria sido possível.

Ao meu orientador, Professor Dr. Volnei Pauletti, expressei minha mais profunda gratidão. Sem sua orientação, nada disso teria sido possível. Agradeço a Deus pelo seu dom de ensinar, pela generosidade em compartilhar conhecimento, pela paciência, confiança e constante incentivo. Sua postura ética, competência científica e humanidade foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional, deixando marcas que levarei por toda a minha trajetória.

À minha coorientadora, Professora Dra. Márcia Simão Toffani Soares, pelo acompanhamento atento, pelas contribuições valiosas e pela disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao coorientador Professor Dr. Cícero Deschamps e ao técnico Roger Cipriano, agradeço pela receptividade em seu laboratório, pelos auxílios nas análises e pelo suporte técnico essencial para a execução desta pesquisa.

A todos os professores com os quais tive a oportunidade de aprender ao longo desta trajetória acadêmica, levo cada um em meu coração. Antonio Carlos Vargas Motta, Jair Zanon, Jairo Caldelari, Renato Marques, Samir Jasper, Volnei Pauletti e Danilo Eduardo Rozane, cada um contribuiu de forma singular para minha formação. Entro neste programa como aluna e saio como uma profissional melhor, mais crítica e mais preparada, graças a cada ensinamento recebido.

À Camila Silva Rocha, onde tudo começou, que sem a qual eu nem teria realizado a inscrição para o programa.

Denise de Conti, pelo apoio constante, pela disponibilidade e pelo auxílio dedicado ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, sempre com paciência e atenção.

À Embrapa Florestas, instituição fundamental para a viabilização e consolidação deste projeto, por meio da parceria científica que possibilitou a condução dos experimentos. Agradeço pela infraestrutura disponibilizada, pelo suporte técnico e científico e pela contribuição decisiva para a execução e qualidade desta pesquisa.

Ao proprietário da Fazenda Água Viva, Márcio Olsen Pizzato, pela concessão das áreas utilizadas para a instalação e manutenção dos experimentos, tornando possível a realização do trabalho em condições reais de cultivo.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta dissertação.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, deixo registrada minha sincera gratidão.

“Não importa quão devagar você vá, desde que não pare”.

Confucius

RESUMO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) apresenta crescente demanda comercial, o que tem intensificado o interesse em sistemas de cultivo mais produtivos, sem comprometer a qualidade fitoquímica das folhas. Neste estudo, avaliou-se o efeito da densidade de plantio e da adubação nitrogenada na produtividade e composição química da erva-mate em dois experimentos de longa duração, ambos com textura muito argilosa conduzidos em General Carneiro, PR. No experimento 1, foram testadas três densidades de plantio (9.090, 13.333 e 25.000 plantas ha⁻¹) combinadas a cinco doses de nitrogênio (N) (0, 37,5, 75 e 225 kg ha⁻¹). No experimento 2, avaliaram-se duas cultivares clonais (BRS BLD Yari e BRS BLD Aupaba) submetidos a cinco doses de N (0, 44, 88, 132 e 176 kg ha⁻¹ ano⁻¹). A produtividade comercial foi determinada com base na massa fresca (MF) de folhas e galhos finos, e a composição fitoquímica das folhas (ácidos cafeoilquínicos, cafeína e teobromina) foi quantificada por HPLC. A maior densidade (25.000 plantas ha⁻¹) foi mais produtiva, atingindo aproximadamente 7.500 kg ha⁻¹ de massa fresca por corte, com sete meses de diferença entre o corte anterior, enquanto as doses de N não alteraram a produtividade nesse experimento. Com relação as cultivares avaliadas, observou-se aumento crescente da produtividade em função da adubação nitrogenada. A cultivar Yari apresentou a maior produtividade, com incremento de 100% na dose de 140 kg ha⁻¹ de N em relação ao controle sem adubação, alcançando 12.520 kg ha⁻¹ de massa fresca. Em contraste, a cultivar Aupaba apresentou concentrações de cafeína quase 200 vezes superiores às observadas em Yari. Os teores de cafeína e teobromina estiveram fortemente associados ao componente genético. A adubação nitrogenada promoveu melhoria da qualidade fitoquímica, com aumento nos teores da maioria dos compostos cafeoilquínicos, enquanto o sistema de plantio não exerceu influência sobre esses atributos.

Palavras-Chave: compostos fenólicos. nutrição de plantas. densidade populacional. cultivares clonais.

ABSTRACT

Yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) has experienced increasing market demand, intensifying interest in more productive cultivation systems without compromising leaf phytochemical quality. This study evaluated the effects of planting density and nitrogen (N) fertilization on yield and chemical composition of yerba mate in two long-term field experiments both soils exhibited a very clayey texture conducted in General Carneiro, Paraná State, Brazil. In Experiment 1, three planting densities (9,090; 13,333; and 25,000 plants ha⁻¹) were combined with five N rates (0, 37.5, 75, and 225 kg ha⁻¹). In Experiment 2, two clonal cultivars (BRS BLD Yari and BRS BLD Aupaba) were subjected to five annual N rates (0, 44, 88, 132, and 176 kg ha⁻¹ yr⁻¹). Commercial yield was determined based on fresh mass (FM) of leaves and thin branches, and leaf phytochemical composition (caffeoylquinic acids, caffeine, and theobromine) was quantified by high-performance liquid chromatography (HPLC). The highest planting density (25,000 plants ha⁻¹) resulted in the greatest productivity, reaching approximately 7,500 kg ha⁻¹ of fresh mass per harvest, with a seven-month interval relative to the previous cut, whereas N rates did not affect yield in this experiment. In contrast, a positive yield response to N fertilization was observed among the evaluated cultivars. The cultivar Yari exhibited the highest productivity, with a 100% increase at 140 kg ha⁻¹ N compared to the unfertilized control, reaching 12,520 kg ha⁻¹ fresh mass. Conversely, the cultivar Aupaba presented caffeine concentrations nearly 200-fold higher than those observed in Yari. Caffeine and theobromine contents were strongly associated with genetic background. Nitrogen fertilization improved phytochemical quality by increasing the concentration of most caffeoylquinic acid derivatives, whereas the planting system did not influence these attributes.

Keywords: phenolic compounds. plant nutrition. plant population density. clonal cultivars.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 – ÁREA DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE (ADAPTADO DE CROGE et al., 2020) E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL NO MUNICÍPIO DE GENERAL CARNEIRO – PR.....21
- FIGURA 2 – TEOR DE NITROGÊNIO EM FOLHAS (A) E GALHOS (B) DE ERVA-MATE (A) SUBMETIDAS A DIFERENTES DOSES NITROGÊNIO... 35
- FIGURA 3 – INFLUÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NOS ÁCIDOS CAFEOILQUÍNICOS NA ERVA-MATE. (A) 5-CQA - ÁCIDO CLOROGÊNICO; (B) 4-CQA ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO; (C) 3.5-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO; (D) 3.4-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO; (E) 4.5-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO....41
- FIGURA 4 – TEOR DE NITROGÊNIO EM FOLHAS DOS CLONES AUPABA E YARI DE ERVA-MATE EM FUNÇÃO DAS DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS NA ADUBAÇÃO.....47
- FIGURA 5 – PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA (MFECOM) (A) E SECA (MSECOM) (B) COMERCIAL DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO.....49
- FIGURA 6 - INFLUÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA SOBRE OS TEORES DE ÁCIDOS CAFEOILQUÍNICOS NA ERVA-MATE. (A) 3,5-DICQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO); (B) 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO); (C) 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO).....55

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SOLOS DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS NOS EXPERIMENTOS 1 (ADENSAMENTO DE PLANTIO × ADUBAÇÃO NITROGENADA) E 2 (CLONES × ADUBAÇÃO NITROGENADA), ANTES DA INSTALAÇÃO NO ANO DE 2018 | 22 |
| TABELA 2 – DOSES DE N, P ₂ O ₅ E K ₂ O APLICADAS NO EXPERIMENTO ANTES DA COLHEITA AVALIADA (11/2024), UTILIZANDO COMO FONTE A UREIA, SUPERFOSFATO SIMPLES E CLORETO DE POTÁSSIO..... | 24 |
| TABELA 3 – DOSES DE N, P ₂ O ₅ E K ₂ O APLICADAS NO EXPERIMENTO GENERAL CARNEIRO – PR, UTILIZANDO COMO FONTE A UREIA, SUPERFOSFATO SIMPLES E CLORETO DE POTÁSSIO..... | 26 |
| TABELA 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VARIÂNCIA DA PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) (MFECOM), MASSA SECA COMERCIAL (MSECOM), TEOR DE NITROGÊNIO NAS FOLHAS (NFOLIAR) E NOS GALHOS (N GALHOS), E TEOR DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS, AVALIADAS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO, EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO E POPULAÇÃO DE PLANTAS..... | 31 |
| TABELA 5 – EFEITO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA (DOSE N) E DA POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP) SOBRE A PRODUTIVIDADE E A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ERVA-MATE, EXPRESSA PELA MASSA FRESCA (MFECOM), MASSA SECA (MSECOM), TEOR DE NITROGÊNIO NAS FOLHAS (NFOLIAR) E NOS GALHOS (N GALHOS), CAFEÍNA E TEOBROMINA, AVALIADAS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO E DENSIDADES DE PLANTIO..... | 32 |
| TABELA 6 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE TEORES DE COMPOSTOS FENÓLICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DOSEN) E POPULAÇÕES DE PLANTAS (PP)..... | 39 |
| TABELA 7 – | TEORES DOS ÁCIDOS CAFEOLQUINICOS EM FOLHAS DE ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DOSEN) E POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP)..... | 40 |
| TABELA 8 – | ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA (MFECOM) E SECA (MSECOM) DE ERVA-MATE COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) E DE MASSA FRESCA (MFGG) E SECA (MSGG) DE GALHOS GROSSOS, TEOR DE NITROGÊNIO (NFOLHAS) E DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS DE ERVA-MATE DE DIFERENTES CLONES SUBMETIDOS A DOSES DE NITROGÊNIO, APÓS SEIS ANOS DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO A CAMPO, EM GENERAL CARNEIRO - PR..... | 44 |
| TABELA 9 – | PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA (MFECOM) E SECA (MSECOM) DE ERVA-MATE COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) E DE MASSA FRESCA (MFGG) E SECA (MSGG) DE GALHOS GROSSOS, TEOR DE NITROGÊNIO (NFOLHAS) E DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS DE DIFERENTES CLONES DE ERVA-MATE, APÓS SEIS ANOS DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO A CAMPO, EM GENERAL CARNEIRO – PR... | 45 |
| TABELA 10 – | ANÁSE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE TEOR NAS FOLHAS DE ERVA-MATE DOS ÁCIDOS CCAFEOLQUINICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), | |

| | | |
|-----------|---|----|
| | 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DoseN) E MATERIAIS CLONAIIS..... | 53 |
| TABELA 11 | – TEORES DOS ÁCIDOS CAFEOLQUINICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOGRÔGENICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOGRÔGENICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO E DENSIDADES DE PLANTIO..... | 54 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| 3,4-DiCQA | - 3,4 Dicafeolquinico |
| 3,5-DiCQA | - 3,5 Dicafeolquinico |
| 3-CQA | - Ácido 3-cafeoilquínico (ácido neoclorogênico) |
| 4,5-DiCQA | - 3,5 Dicafeolquinico |
| 4-CQA | - Ácido 4-cafeoilquínico (ácido criptoclorogênico) |
| 5-CQA | - Ácido 5-cafeoilquínico (ácido clorogênico) |
| AN | - Adubação nitrogenada |
| ANOVA | - Análise de variância |
| BRS | - Brasil Pesquisa (denominação institucional da Embrapa para cultivares) |
| BLB | - Base de Linhagem Derivada (material clonal ou geneticamente selecionado) |
| CQA | - Ácidos cafeoilquínicos |
| diCQA | - Ácidos dicafeoilquínicos |
| ECOM | - Erva-mate comercial |
| EUN | - Eficiência de uso do nitrogênio |
| FO | - Folhas |
| GF | - Galho fino < 7 mm |
| GG | - Galhos grossos >7mm |
| HPLC | - Cromatografia líquida de alta eficiência |
| K | - Potássio |
| KCl | - Cloreto de Potássio |
| MFECOM | - Massa fresca da erva-mate comercial |
| MSECOM | - Massa seca da erva-mate comercial |
| N | - Nitrogênio |
| NS | - Não significativo |
| P | - Fósforo |
| PP | - População de plantas |
| SFS | - Superfosfato simples |
| SW | - Teste de Shapiro–Wilk |
| T | - Tratamento |
| U | - Ureia |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | HIPÓTESES E OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1.1 | Hipóteses geral..... | 18 |
| 1.1.1.1 | Hipóteses específicas..... | 18 |
| 1.1.2 | Objetivo geral | 19 |
| 1.1.2.1 | Objetivos específicos..... | 19 |
| 2 | MATERIAL E METODOS..... | 21 |
| 2.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA..... | 21 |
| 2.2 | EXPERIMENTO 1: DENSIDADE DE PLANTIO E ADUBAÇÃO NITROGENADA | 23 |
| 2.3 | EXPERIMENTO 2: CULTIVARES CLONAIIS DE ERVA-MATE E ADUBAÇÃO NITROGENADA | 25 |
| 2.4 | PROCEDIMENTOS COMUNS AOS DOIS EXPERIMENTOS | 27 |
| 2.4.1 | Determinação de metabólitos secundários..... | 27 |
| 2.4.2 | Determinação do teor de Nitrogênio | 28 |
| 2.4.3 | Análise Estatística | 29 |
| 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 3.1 | EXPERIMENTO 1: DENSIDADE DE PLANTIO E ADUBAÇÃO NITROGENADA | 31 |
| 3.2 | EXPERIMENTO 2: CULTIVARES CLONAIIS DE ERVA-MATE E ADUBAÇÃO NITROGENADA | 43 |
| 4 | CONCLUSÃO..... | 58 |
| 5 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) é uma espécie arbórea perene, pertencente à família Aquifoliaceae, com distribuição natural na região subtropical da América do Sul, particularmente no Brasil, Paraguai e Argentina, que se consolidaram como os únicos produtores em escala mundial (RESENDE et al., 2000; CARVALHO, 2003). No Brasil, a espécie apresenta forte relevância socioeconômica e cultural, especialmente na região Sul, onde é tradicionalmente consumida na forma de chimarrão e tereré, além de seu uso crescente na indústria alimentícia, fitoterápica e cosmética (CROGE et al., 2020). O país lidera a produção global, alcançando 841.225 toneladas em 2024, sendo o estado do Paraná responsável por cerca de 55% desse volume (IBGE, 2024), o que reforça a importância estratégica da cultura para a economia regional.

Durante décadas, o sistema predominante de produção baseou-se na extração de folhas de plantas nativas, conduzidas sob condições de baixo manejo e sem adubação, caracterizando uma atividade de caráter extrativista (JUNKEIRA et al., 2017). Embora ainda praticado por grande parte dos agricultores, esse modelo apresenta limitações crescentes, uma vez que a demanda por matéria-prima de qualidade superior e produção contínua tem exigido sistemas agrícolas mais tecnificados (WENDLING; SANTIN, 2015; BERGAMIM et al., 2024). A adoção de plantios comerciais e o uso de mudas selecionadas representam avanços significativos, porém a consolidação de sistemas de cultivo eficientes exige compreensão aprofundada das interações entre manejo, nutrição e respostas fisiológicas da planta.

O incremento na densidade populacional tende a elevar de forma significativa a produtividade por unidade de área dos ervais, em função do maior acúmulo de folhas e brotos jovens, características essenciais para atender mercados especializados, como os de chás de alta qualidade, bebidas energéticas, cosméticos e outros produtos alimentícios. Sistemas adensados reduzem em cerca de 80% o intervalo entre colheitas e aumentam o potencial de mecanização, o que é estratégico dado que aproximadamente 40% dos custos de manejo concentram-se na colheita; essa otimização diminui gastos operacionais e antecipa a disponibilidade de biomassa (EMBRAPA, 2024). Contudo, o adensamento intensifica a competição por luz, água e nutrientes, requerendo ajustes no manejo da nutrição,

com ênfase no fornecimento de N, elemento cuja demanda pelas plantas é elevada e contínua (GABIRA et al., 2023).

O N é componente essencial de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofilas, sendo determinante para o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa (TAIZ et al., 2017; FERNANDES et al., 2018; PAULETTI; SERRAT, 2025). Esse elemento tem sido identificado como um dos nutrientes mais frequentemente limitantes em ervais comerciais, estando fortemente associado ao crescimento vegetativo e ao acúmulo de biomassa (Lisboa et al., 2024).

Em sistemas manejados, a adubação nitrogenada tende a estimular o crescimento, aumentar a área foliar e acelerar a rebrota pós colheita (HERMS; MATTSON, 1992). No entanto, a disponibilidade elevada de N pode afetar o metabolismo de compostos secundários envolvidos na defesa, como polifenóis, flavonoides e alcaloides (WATSON, 2010). Embora a teoria clássica de alocação de carbono versus N proponha redução na síntese de metabólitos secundários sob alta disponibilidade de N (HERMS; MATTSON, 1992), evidências para espécies perenes e lenhosas, como a erva-mate, ainda são inconsistentes. Essa lógica apresenta implicações diretas para a erva-mate, pois a qualidade sensorial e funcional das folhas está fortemente relacionada à composição de metabólitos como ácidos cafeoilquínicos, cafeína e teobromina (BRACESCO et al., 2011; FILIP et al., 2015; KHAN et al., 2018).

Esses compostos bioativos são considerados importantes por apresentarem, principalmente, atividades antioxidante e anti-inflamatória, além de potenciais efeitos metabólicos, cardioprotetores e neuroprotetores (MAGAÑA et al., 2021), esses teores variam conforme idade da folha, luminosidade, condições edafoclimáticas e características genéticas (HECK; DE MEJÍA, 2007; BLUM-SILVA et al., 2015). Estudos indicam que plantas jovens e folhas expostas apresentam maiores teores de metilxantinas e ácidos fenólicos (TOMASI, 2020; DUARTE et al., 2022). Além disso, pesquisas recentes revelam elevada variabilidade entre genótipos para a síntese desses compostos (FLOSS et al., 2022; BENEDITO et al., 2023), evidenciando a importância do material genético na definição da qualidade final do produto.

Nesse contexto, destacam-se as cultivares clonais BRS BLD Yari e BRS BLD Aupaba, obtidas pela Embrapa visando maior produtividade, arquitetura de planta adequada à colheita e sabor mais suave, em plantio com espaçamento convencional

(WENDLING et al., 2017). A cultivar Yari apresenta folhas estreitas, hábito de crescimento ereto e maior eficiência no uso da água, enquanto o Aupaba possui folhas largas, desenvolvimento vegetativo vigoroso e maior acúmulo de cafeína (WENDLING et al., 2017; AGUIAR et al., 2023).

O estado nutricional de N em *Ilex paraguariensis* apresenta elevada sensibilidade aos sistemas de produção, influenciando diretamente tanto o crescimento vegetativo quanto o metabolismo secundário da espécie. Em sistemas intensivos com adubação mineral, observa-se incremento no teor de N foliar e na síntese de compostos nitrogenados, como metilxantinas, refletindo maior atividade metabólica primária (Croge et al., 2021). Em contrapartida, sistemas menos intensificados ou sob restrição nutricional tendem a induzir alterações no balanço carbono/nutriente, favorecendo o acúmulo de metabólitos secundários, especialmente compostos fenólicos, como estratégia de defesa (Herms & Mattson, 1992). Entretanto, os efeitos da adubação nitrogenada sobre os fenólicos não são lineares, podendo variar conforme o sistema de cultivo e fatores ambientais (Tomasi et al., 2025).

Apesar de avanços genéticos expressivos, não foram encontrados estudos que integrem avaliação de produtividade, densidade de plantio, nutrição nitrogenada e composição fitoquímica em condições reais de cultivo ao longo do tempo.

Assim, permanece uma lacuna científica quanto à capacidade de sistemas adensados e sistemas convencionais com diferentes clones, ambos sob diferentes doses de N, de aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade fitoquímica das folhas. Neste contexto, avaliamos os efeitos do N e da densidade populacional sobre o desempenho produtivo e a composição fitoquímica da erva-mate em dois experimentos de longa duração: um com plantas seminais sob diferentes densidades e doses de N, e outro com cultivares clonais submetidas a doses de N em plantio convencional. Esses resultados contribuem para a compreensão integrada das interações entre crescimento, nutrição mineral e qualidade fitoquímica, subsidiando estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis.

1.1 HIPÓTESES E OBJETIVOS

1.1.1 Hipótese geral

Adubação nitrogenada e a densidade populacional aumentam a produtividade da erva-mate, sem comprometer a qualidade fitoquímica das folhas.

1.1.1.1 Hipóteses específicas

Doses crescentes de adubação nitrogenada promovem incremento na produtividade da erva-mate sob diferentes densidades populacionais e materiais clonais

Maiores densidades de plantio resultam em maior produtividade por área.

Diferentes densidades populacionais e doses crescentes de nitrogênio não alteram os teores de compostos bioativos nas folhas.

Cultivares de erva-mate apresentam respostas diferenciadas à adubação nitrogenada quanto à produtividade.

O aumento da disponibilidade de N promove incremento da produtividade, independentemente do clone.

Os teores de compostos bioativos das folhas não são alterados pela adubação nitrogenada nos diferentes sistemas avaliados.

1.1.1.2 Objetivo geral

Avaliar os efeitos da adubação nitrogenada e densidade populacional na produtividade e a qualidade fitoquímica da erva-mate em diferentes materiais genéticos.

1.1.1.2.1 Objetivos específicos

Avaliar o impacto do adensamento de plantas na produtividade de folhas e ramos finos da erva-mate.

Avaliar os efeitos de diferentes doses de N sobre a produtividade da erva-mate, considerando distintos materiais genéticos (clones) em sistema de plantio convencional e plantas seminais cultivadas sob altas densidades populacionais.

Verificar a influência da densidade populacional e da adubação nitrogenada sobre os teores de compostos bioativos nas folhas.

Quantificar a resposta produtiva de diferentes clones de erva-mate à adubação nitrogenada.

Avaliar o efeito da dose de N sobre a qualidade fitoquímica das folhas nos diferentes clones.

Identificar possíveis interações entre clone e dose de N que otimizem simultaneamente produtividade e qualidade.

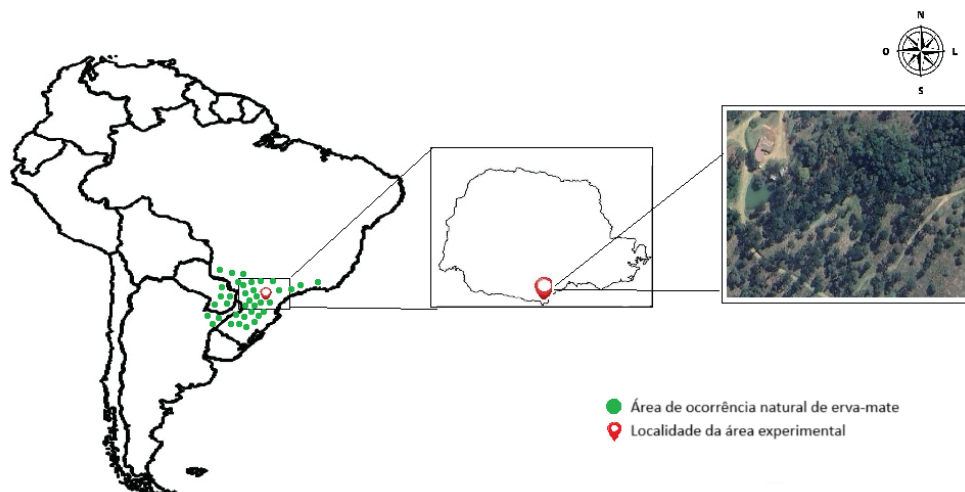
Avaliar o efeito das doses de N sobre o teor foliar de N em plantas de erva-mate.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área

Foram avaliados dois experimentos de longa duração conduzidos em campo na Fazenda Água Viva, no município de General Carneiro, PR (26°25'39" S, 51°18'56" W), localizado no Terceiro Planalto Paranaense. O cultivo de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é tradicional na região, onde apresenta ampla distribuição (CROGE et al., 2020), conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 – ÁREA DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE (ADAPTADO DE CROGE et al., 2020) E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL NO MUNICÍPIO DE GENERAL CARNEIRO – PR.



Fonte: A autora 2026 (foto google Earth).

O clima da região de General Carneiro (PR) é classificado como Cfb, segundo o sistema de Köppen, caracterizando-se como subtropical úmido mesotérmico, sem estação seca definida e com verões amenos. Essa classe climática apresenta distribuição uniforme das precipitações pluviométricas ao longo do ano, temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C e ocorrência frequente de geadas, sendo típica de áreas de maior altitude do sul do Brasil (ALVARES, 2013). A paisagem é constituída por terras com altitudes 938 metros e com relevo variando de plano nas cumieiras curtas a forte ondulado nas encostas.

Ambos os experimentos apresentam solos formados a partir de rochas da Formação Serra Geral, em uma condição de coexistência de classes com graus de evolução distintos, associados à heterogeneidade do relevo. Nos trechos de maior declividade (Experimento 1), predominam Neossolo Litólico Distrófico fragmentário e Neossolo Regolítico Distrófico leptofragmentário, enquanto nos topos e em posições de meia encosta (Experimento 2) ocorre associação de Latossolo Amarelo Distrófico cambissólico e Cambissolo Háptico Tb Distrófico latossólico ou típico, conforme classificação estabelecida pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

A identificação e a classificação taxonômica dos solos foram realizadas por pedólogo habilitado, mediante descrição morfológica de perfis representativos em campo, complementada por análises físicas e químicas em laboratório, seguindo rigorosamente os critérios diagnósticos e hierárquicos preconizados pelo referido sistema

Nos dois ambientes, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, os solos apresentam textura muito argilosa, elevada acidez, baixos teores de bases trocáveis e teores muito altos de carbono orgânico (PAULETTI; MOTTA, 2017) (TABELA 1).

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SOLOS DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS NOS EXPERIMENTOS 1 (ADENSAMENTO DE PLANTIO × ADUBAÇÃO NITROGENADA) E 2 (CLONES × ADUBAÇÃO NITROGENADA), ANTES DA INSTALAÇÃO NO ANO DE 2018.

| | pH H ₂ O | pH CaCl ₂ | Ca | Mg | Al | H+Al | K | P | Argila | Silte | Areia |
|---------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----|-----|------|------|---------------------|--------------------|-------|-------|
| | | | cmolc dm ⁻³ | | | | | mg dm ⁻³ | g kg ⁻¹ | | |
| Experimento 1 | 3,8 | 4,4 | 0,1 | 0,2 | 4,3 | 16,3 | 0,07 | 1,6 | 788 | 125 | 87 |
| Experimento 2 | 4,1 | 4,7 | 0,10 | 0,2 | 4,8 | 17,2 | 0,1 | 1,5 | 755 | 134 | 111 |

LEGENDA: P = fósforo disponível (Mehlich-1); C = carbono orgânico total; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio trocável; H+Al = acidez potencial.

A área destinada ao estabelecimento dos experimentos com erva-mate, nos quais foram implantados os tratamentos experimentais, era anteriormente ocupada por um povoamento de *Pinus taeda*, implantado em 2000 e submetido ao corte, a limpeza com queima total dos resíduos da colheita em 2017. Na sequência, foi realizada a limpeza e o preparo do solo, com escarificador e aplicação de 5 toneladas por hectare de calcário dolomítico em área total visando ao melhor estabelecimento das mudas em 2018.

Os adubos utilizados para compor as diferentes doses de nutrientes, nos dois experimentos, foram a ureia (U – 45% de N), o superfosfato simples (SFS – 18% de P_2O_5) e o cloreto de potássio (KCl – 60% de K_2O).

Para estimativa do N acumulado na fração comercial, utilizou-se a concentração média de N obtida para as amostras avaliados. O cálculo foi realizado pela multiplicação da concentração média de N ($g\ kg^{-1}$) pela massa seca comercial ($kg\ ha^{-1}$), com posterior conversão para $kg\ ha^{-1}$.

2.2 Experimento 1: Densidade de plantio e adubação nitrogenada

No Experimento 1 adotou-se delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo a dose de N (DoseN) a parcela principal e a densidade populacional a subparcela.

Cada unidade experimental foi composta por 36 plantas, dispostas em duas linhas, com 18 plantas por linha. O plantio foi realizado em setembro de 2018, utilizando mudas seminais provenientes de viveiro regional. Em janeiro de 2019, aproximadamente quatro meses após o plantio, realizou-se a poda de formação, com a remoção do meristema apical, com o objetivo de estimular a brotação lateral e favorecer a conformação arquitetural das plantas, conforme descrito por Gabira (2022).

As adubações com N foram definidas com base em percentuais da dose anual recomendada para a cultura, conforme o manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2017), correspondendo aos tratamentos (T) 0%, 50%, 100%, 200% e 300%, equivalentes, respectivamente, a 0, 37,5, 75, 150 e 225 $kg\ ha^{-1}$ de N por ano.

As aplicações realizadas nas fases de plantio e pós-plantio corresponderam a parcelas dessas doses anuais, conforme apresentado na Tabela 2, enquanto as doses totais anuais foram integralmente consideradas nas fases produtivas subsequentes.

TABELA 2 - DOSES DE N, P₂O₅ E K₂O APLICADAS NO EXPERIMENTO ANTES DA COLHEITA AVALIADA (11/2024), UTILIZANDO COMO FONTE A UREIA, SUPERFOSFATO SIMPLES E CLORETO DE POTÁSSIO.

| Época/Adubação | Data | N (% da dose recomendada) | | | | | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|--|------------|---------------------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------------------------|------------------|
| | | 0 | 50 | 100 | 200 | 300 | | |
| kg ha⁻¹ ano⁻¹ | | | | | | | | |
| Plantio (cova) | 09/2018 | 0 | 22,0 | 44 | 88 | 132 | 153,9 | 42,5 |
| Pós-plantio | 01/2019 | 0 | 22,0 | 44 | 88 | 132 | 153,9 | 42,5 |
| Produção safra 2022/23 | Total | | 37,5 | 75 | 150 | 225 | 0 | 150 |
| | 28/09/2022 | 0 | 18,75 | 37,5 | 75 | 112,5 | 0 | 75,0 |
| | 06/12/2022 | 0 | 9,38 | 18,75 | 37,5 | 56,25 | 0 | 0 |
| | 06/03/2023 | 0 | 9,38 | 18,75 | 37,5 | 56,25 | | 75,0 |
| Produção safra 2023/24 | Total | | 37,5 | 75 | 150 | 225 | 0 | 150 |
| | 19/09/2023 | 0 | 18,75 | 37,5 | 75 | 112,5 | 0 | 75 |
| | 18/01/2024 | 0 | 18,75 | 37,5 | 75 | 112,5 | 0 | 75 |
| 9 ^a Colheita | 08/04/2024 | 0 | 37,5 | 75 | 150 | 225 | 0 | 150 |
| 10^a Colheita * | 26/11/2024 | | | | | | | |

Legenda: * representa a colheita utilizada para avaliação das variáveis experimentais.

Foram avaliadas três densidades de plantio, todas superiores àquelas usualmente empregadas em sistemas comerciais da cultura, cuja densidade de referência varia entre 2.222 e 2.700 plantas ha⁻¹ (GOULART et al., 2022). O espaçamento entre linhas foi fixado em 1,00 m, enquanto o espaçamento entre plantas na linha variou conforme o tratamento, sendo de 1,10 m, 0,75 m e 0,40 m, correspondendo, respectivamente, às densidades de 9.090, 13.333 e 25.000 plantas ha⁻¹.

Para compor a bordadura das parcelas, foram implantadas duas linhas adicionais entre as duas linhas da parcela útil, espaçadas entre si em 0,80 m, com espaçamento de 1,12 m entre plantas na linha. A distância entre as linhas duplas da parcela útil e da bordadura foi de 2,20 m, visando minimizar efeitos de bordadura e interferências entre tratamentos adjacentes.

A colheita foi realizada mecanicamente, com utilização de serra motorizada, efetuando-se corte uniforme ao longo da linha e nas laterais, em sistema semelhante à desrama contínua, a 1,2 m de altura, preservando-se no mínimo 15% da massa foliar remanescente.

Foram colhidas as 36 plantas de cada parcela experimental. O material colhido foi pesado em campo para determinação da massa fresca da erva-mate comercial (MFECOM), composta por folhas (FO) e galhos finos (GF; < 7 mm de diâmetro).

De cada parcela, foi retirada uma subamostra representativa de aproximadamente 500 g da fração FO+GF. Nessa subamostra, as FO foram separadas dos GF e cada fração teve sua massa fresca determinada individualmente. Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 40 °C até massa constante.

Com base no teor de umidade determinado após a secagem, estimou-se a produtividade de massa seca da erva-mate comercial (MSECOM) a partir da respectiva produtividade de massa fresca. A produtividade de MFECOM (kg ha^{-1}) foi calculada dividindo-se a massa total colhida por parcela pelo número de plantas colhidas e multiplicando-se o resultado pela densidade de plantas por hectare.

A avaliação considerada neste estudo correspondeu à 10ª colheita, realizada em novembro de 2024, com diferença de sete meses em relação a colheita anterior, com histórico de sucessivas colheitas ao longo dos ciclos produtivos da cultura.

2.3 Experimento 2 - Cultivares clonais de erva-mate e adubação nitrogenada

O Experimento 2 foi implantado em 2018 e conduzido em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, em parcelas subdivididas, sendo as doses de N alocadas nas parcelas e os clones nas subparcelas. O espaçamento adotado foi de 3,0 m entre linhas e 1,5 m entre plantas, correspondendo a uma densidade de 2.222 plantas ha^{-1} . Cada parcela foi composta por seis linhas com cinco plantas por linha, sendo as linhas externas consideradas bordadura. Nas quatro linhas úteis, duas para cada clone, as plantas das extremidades foram descartadas, totalizando seis plantas úteis por clone para as coletas.

As doses e as formas de aplicação de N foram ajustadas em função das fases de plantio, pós-plantio, formação da copa e produção, compreendendo o período entre a primeira e a terceira colheita, os tratamentos receberam, em $\text{g planta}^{-1} \text{ano}^{-1}$ a 0, 19,8, 39,6, 59,4 e 79,2, equivalendo a 0, 44, 88, 132 e 176 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ de N, que corresponde a aproximadamente 0%, 50%, 100%, 150% e 200% da dose de N recomendada em (PAULETTI; MOTTA, 2017).

A opção pela expressão e aplicação das doses em base individual por planta teve como finalidade aumentar a precisão da adubação nitrogenada, assegurando que cada unidade experimental recebesse a quantidade de nutriente correspondente ao tratamento previamente estabelecido.

No plantio das mudas, o adubo nitrogenado foi incorporado à cova, juntamente com os fertilizantes fosfatado e potássico. As aplicações subsequentes de fertilizantes foram realizadas de forma superficial, na projeção da copa, a aproximadamente 20 cm do tronco, e parceladas em duas épocas anuais (PAULETTI; MOTTA, 2017), nos meses de setembro e fevereiro. A coleta de dados foi realizada durante a adubação de formação de copa II, conforme apresentado na Tabela 3.

TABELA 3 - DOSES DE N, P₂O₅ E K₂O APLICADAS NO EXPERIMENTO GENERAL CARNEIRO – PR, UTILIZANDO COMO FONTE A UREIA, SUPERFOSFATO SIMPLES E CLORETO DE POTÁSSIO.

| População de plantas: 2222/ha | | | | | | | | | |
|--|-------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|------------------|---------------------------|
| Época | Data | N | | | | | P ₂ O ₅ | K ₂ O | OBS |
| kg ha ⁻¹ | | | | | | | | | |
| Adubação de Plantio - (cova) | 07/08/18 | 0 | 11 | 22 | 44 | 66 | 66 | 44 | Total incorporado na cova |
| ADUBAÇÃO DE COBERTURA (Kg ha ⁻¹) | | | | | | | | | |
| Pós plantio | 18/09/2019 | 0 | 5,5 | 11 | 22 | 33 | 22 | 14,7 | |
| | 05/02/2020 | 0 | 5,5 | 11 | 22 | 33 | 22 | 14,7 | |
| | 07/08/2020 | 0 | 5,5 | 11 | 22 | 33 | 22 | 14,7 | |
| | 28/01/2021 | 0 | 5,5 | 11 | 22 | 33 | 22 | 14,7 | |
| | Total | 0 | 22 | 44 | 88 | 132 | 88 | 58,8 | |
| Primeira colheita Formação da copa I 2021/2023 | 10/09/2021 | | | | | | | | |
| | 10/09/2021 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 1º Sem. 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | 28/09/2022 | 0 | 22 | 44 | 67 | 89 | 0 | 0 | |
| Total | 0 | 22 | 44 | 67 | 89 | 0 | 0 | | |
| Segunda colheita Formação da copa II 2023/2024 | 16/02/2023 | | | | | | | | |
| | 16/02/2023 | 0 | 22 | 44 | 66 | 88 | 55 | 33 | 50%dose |
| | 20/09/2023 | 0 | 22 | 44 | 66 | 88 | 55 | 33 | 50% dose |
| | 17/01/2024 | 0 | 22 | 44 | 66 | 88 | 55 | 33 | 50% dose |
| | Total | 0 | 66 | 132 | 198 | 264 | 165 | 99 | |
| Terceira colheita* | 05/08/2024 | | | | | | | | |
| Produção safra | 05/08/2024 | 0 | 22 | 44 | 66 | 88 | 55 | 33 | |

| | | | | | | | | |
|-----------------|------------|---|----|------------|-----|-----|-----|----------|
| 2024/25 | 18/11/2025 | 0 | 66 | 133 | 199 | 266 | 111 | 133 |
| Quarta colheita | | | | 09/02/2026 | | | | |
| | 09/02/2025 | 0 | 33 | 66 | 99 | 133 | | 33% dose |

Obs.: * Representa a 3ª colheita (2024/25), corresponde à safra utilizada nas análises apresentadas nesta dissertação.

As avaliações para este trabalho foram na terceira colheita, realizada em agosto de 2024, sob manejo de corte com intervalos médios de aproximadamente 18 meses entre colheitas.

A colheita foi efetuada com auxílio de serrote e tesoura de poda, mantendo-se, no mínimo, 15% da massa de folhas das plantas. Foram colhidas 3 plantas por parcela, sempre na área útil da mesma. O material colhido foi pesado a campo e determinada a massa fresca da erva-mate comercial (MFECOM), correspondente às folhas (FO) e galhos finos (GF; < 7 mm de diâmetro), e dos galhos grossos (GG; > 7 mm de diâmetro) (MFGG). Os galhos grossos (GG) não são utilizados comercialmente, e permanecem no campo.

Do material colhido em cada parcela, foi separada uma amostra de aproximadamente 500 g de FO+GF e 200g de GG. Nesta amostra as FO foram separadas dos GF e cada fração foi quantificada em massa fresca e em seguida levada à estufa para secagem a 40°C até peso constante.

Com a umidade obtida a partir da secagem das amostras, foram estimadas as produtividades de massa seca (MSECOM) com base na produtividade de massa fresca.

A produtividade da MFECOM e da MFGG foi obtida considerando-se o total colhido por parcela dividido pelo número de plantas colhidas e multiplicado pela população de plantas por hectare.

2.4 Procedimentos comuns aos dois experimentos

2.4.1 Determinação de metabólitos secundários

Imediatamente antes da colheita, em ambos os experimentos, foram coletadas oito folhas jovens (experimento 1) e maduras (experimento 2), livres de ferimentos, de três plantas da área útil de cada parcela, duas em cada ponto cardeal, resultando em 24 folhas e aproximadamente 50 gramas de folhas frescas.

Posteriormente foram armazenados em caixas de isopor até o processamento, que ocorreu em até 24 horas após a colheita para evitar a oxidação das folhas.

A secagem das folhas colhidas foi realizada em forno de micro-ondas, com o objetivo de preservar os metabólitos secundários (ácidos cafeoilquínicos e metilxantinas), conforme a metodologia descrita e validada por Tomasi (2020). Submetidas a aquecimento em potência alta em intervalos de 30 segundos, até atingirem consistência seca e quebradiça (tempo total aproximado de 5 minutos). Entre os intervalos, as folhas foram movimentadas para favorecer a perda de umidade e minimizar a oxidação.

As amostras secas foram moídas e passadas por peneira de malha de 0,25 mm. Posteriormente, foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em freezer (± -5 °C) até a realização das análises.

Para o preparo do extrato aquoso foi utilizada uma alíquota de 250 mg da amostra de folha moída, misturada com ± 12 mL de água ultrapura (resistividade $\geq 18,2$ M Ω ·cm), obtida em sistema Milli-Q® (Merck Millipore), para extração em banho-maria por 1 h a 100 °C (Tomasi, 2020). O extrato foi filtrado em papel filtro faixa azul e armazenado em tubos tipo Falcon, em congelador (± -5 °C). Antes da análise, os tubos foram retirados do congelador para descongelar lentamente em geladeira, por 12 h.

O extrato obtido foi agitado, e 1 mL foi filtrado por meio de microfiltro de seringa, sendo o filtrado transferido para frascos tipo *vial*, previamente identificados. A quantificação dos compostos cafeína (1,3,7-trimetilxantina) e teobromina (3,7-dimetilxantina) e semi quantificação dos ácidos cafeoilquínicos (3-CQA ácido neoclorogênico, 4-CQA ácido criptoclorogênico, 5-CQA ácido clorogênico, 3,5-dicafeoilquínico, 3,4 dicafeoilquínico e 4,5 dicafeoilquínico) foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (*High Performance Liquid Chromatography – HPLC*), com detecção em comprimento de onda ajustado para 254 nm.

A identificação e quantificação dos compostos secundários foi baseada em curvas analíticas construídas a partir de soluções-padrão comerciais: para cafeína, na faixa de 0 a 1,0 mg mL⁻¹, e para teobromina, de 0 a 0,5 mg mL⁻¹. Para identificação e semi quantificação dos ácidos cafeoilquínicos, foram realizadas com base em curva padrão do ácido 3-CQA (Sigma®), na faixa de 0 a 10 mg mL⁻¹.

Os resultados foram expressos em miligramas do composto por grama de amostra seca (mg g⁻¹). A concentração de cada composto foi obtida de forma

indireta, por meio do cálculo da área dos picos cromatográficos, conforme descrito por Camargo e Toledo (1999).

2.4.2 Determinação do teor de nitrogênio

A determinação do teor de N foi realizada nas mesmas amostras vegetais utilizadas para a avaliação da produtividade, abrangendo folhas (FO) e galhos finos (GF; diâmetro < 7 mm). Após a colheita, as amostras foram submetidas à secagem em estufa de circulação de ar forçado a 40 °C até massa constante e, posteriormente, moídas e peneiradas em malha < 1 mm. A quantificação do N foi conduzida pelo método de Kjeldahl, conforme descrito por Silva et al. (2009). Para esse fim, foram pesados 0,1 g de material vegetal seco e moído em tubos de digestão, aos quais foram adicionados 5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, 1 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e 2,0 g de uma mistura catalisadora composta por sulfato de potássio (K_2SO_4) e sulfato de cobre ($CuSO_4$) na proporção de 10:1.

A digestão foi conduzida em bloco digestor com aquecimento gradual, seguindo a sequência: 1 hora a 100 °C, 1 hora a 250 °C e, posteriormente, elevação até 380 °C até completa decomposição da matéria orgânica. Nesse processo, o N orgânico foi convertido em sulfato de amônio.

Após resfriamento, as amostras foram levadas ao destilador de N (Kjeldahl – Tecnal, modelo TE-0365/1). Foram adicionados 20 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH a 50% m/v) à amostra, promovendo a liberação de amônia (NH_3), que foi volatilizada, condensada e coletada em 30 mL de solução de ácido bórico a 3%, contendo indicadores de pH. A amônia reagiu com o ácido bórico, formando borato de amônio, resultando em coloração azul-esverdeada, a qual retornou à tonalidade rosa ao final da titulação com H_2SO_4 0,1 N. A solução resultante foi titulada com H_2SO_4 0,1 N até o ponto final (mudança de coloração para rosa). O volume gasto na titulação foi registrado e utilizado para o cálculo da concentração de N, expressa em percentual (% N) calculada sobre a massa seca do tecido foliar.

2.4.4 Análise Estatística

A avaliação estatística dos dados seguiu um delineamento em parcelas subdivididas. As doses de N foram consideradas como parcelas principais em ambos os experimentos, enquanto as subparcelas foram compostas por três densidades populacionais de plantas (Experimento 1) e duas cultivares clonais (Experimento 2).

Inicialmente, verificou-se a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade de variâncias por inspeção gráfica e pelo teste de Bartlett, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Atendidas as pressuposições do modelo, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) para avaliação das doses de N, densidades populacionais ou clones, bem como das interações entre AN (adubação nitrogenada) e densidades ou entre doses de AN e clones.

Para o fator quantitativo doses de N, quando identificado efeito significativo pela ANOVA, foram ajustados modelos de regressão, selecionando-se o modelo com base na significância dos coeficientes ($p \leq 0,01$), no coeficiente de determinação (R^2). Em caso de não ajuste foi realizado a comparação de médias Tukey ($p \leq 0,05$). Na ausência de interação significativa entre os fatores, os efeitos principais foram avaliados separadamente, e o efeito das doses de N foi analisado por regressão utilizando a média dos clones.

Para os fatores qualitativos (densidades populacionais ou clones), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, versão 4.4.3), com uso dos pacotes estatísticos *easyanova*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EXPERIMENTO 1: DENSIDADE DE PLANTIO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, os quais indicaram distribuição normal dos resíduos ($p > 0,05$), validando o uso do modelo de análise de variância (TABELA 4). Os testes de homogeneidade de variâncias também não apresentaram violações, assegurando a adequação da análise estatística.

TABELA 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VARIÂNCIA DA PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) (MFECOM), MASSA SECA COMERCIAL (MSECOM), TEOR DE NITROGÊNIO NAS FOLHAS (N FOLIAR) E NOS GALHOS (N GALHOS), E TEOR DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS, AVALIADAS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO, EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DoseN) E POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP).

| Testes | MFECOM (kg.ha ⁻¹) | MSECOM (kg.ha ⁻¹) | N Foliar (g.kg ⁻¹) | N Galhos (g.kg ⁻¹) | Cafeína (mg.g ⁻¹) | Teobromina (mg.g ⁻¹) |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Normalidade ¹ | | | | | | |
| SW | 0,1969 | 0,4848 | 0,2512 | 0,9466 | 0,0932 | 0,386 |
| Homogeneidade Bartlett ² | | | | | | |
| DosesN | 0,375 | 0,074 | 0,178 | 0,811 | 0,816 | 0,367 |
| População de Plantas | 0,057 | 0,908 | 0,385 | 0,212 | 0,512 | 0,843 |
| Interação (Dose N x PP) | 0,051 | 0,356 | 0,508 | 0,523 | 0,434 | 0,411 |
| Anova ³ | | | | | | |
| DoseN | 1,22 ^{NS} | 1,60 ^{NS} | 2,27 ^{NS} | 2,07 ^{NS} | 0,520 ^{NS} | 1,57 ^{NS} |
| População de Plantas | 40,46 ^{**} | 99,33 ^{**} | 2,66 ^{NS} | 0,32 ^{NS} | 0,060 ^{NS} | 1,36 ^{NS} |
| Interação (DoseN x PP) | 0,720 ^{NS} | 0,99 ^{NS} | 3,28 ^{**} | 3,16 ^{**} | 0,234 ^{NS} | 1,27 ^{NS} |
| Coefficiente Variação(%) | | | | | | |
| Resíduo A | 36,59 | 27,04 | 11,51 | 16,23 | 44,28 | 37,39 |
| Resíduo B | 29,86 | 18,39 | 6,95 | 14,10 | 26,74 | 33,68 |

Legenda: ¹ SW – Teste de Shapiro Wilk: ($p \leq 0,05$) dados não normais e ($p > 0,05$) dados normais, ² Teste de Bartlett: ($p \leq 0,05$) dados não homogêneos e ($p > 0,05$) dados homogêneos, ³ Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; ($p < 0,05$) e ^{**} ($p < 0,01$) significativo.

FONTE: A Autora (2026)

A análise de variância revelou efeito significativo ($p < 0,01$) da população de plantas (PP) sobre a produtividade de massa fresca comercial (MFECOM) e massa seca (MSECOM) de erva-mate. A maior produtividade de MFECOM foi observada na densidade de 25.000 plantas ha⁻¹, alcançando aproximadamente 7.500 kg ha⁻¹,

valor significativamente superior aos obtidos nas demais densidades avaliadas (TABELA 5). Esse desempenho é expressivo, considerando que a colheita foi realizada apenas sete meses após o corte anterior.

TABELA 5 – EFEITO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA (DOSE N) E DA POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP) SOBRE A PRODUTIVIDADE E A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ERVA-MATE, EXPRESSA PELA MASSA FRESCA (MFECOM), MASSA SECA (MSECOM), TEOR DE NITROGÊNIO NAS FOLHAS (NFOLIAR) E NOS GALHOS (N GALHOS), CAFEÍNA E TEOBROMINA, AVALIADAS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DoseN) E POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP).

| Testes | MFECOM (kg,ha ⁻¹) | MSECOM (kg,ha ⁻¹) | NFoliar (g,kg ⁻¹) | N Galhos (g,kg ⁻¹) | Cafeína (mg,g ⁻¹) | Teobromina (mg,g ⁻¹) |
|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| DoseN | | | | | | |
| 0 kg ha ⁻¹ | 4.512 | 1.352 | 21,8 | 9,4 | 8,58 | 3,09 |
| 37,5 kg ha ⁻¹ | 5.921 | 1.591 | 22,4 | 11,4 | 12,09 | 3,99 |
| 75 kg ha ⁻¹ | 4.593 | 1.392 | 23,4 | 10,1 | 11,36 | 4,53 |
| 150 kg ha ⁻¹ | 5.455 | 1.667 | 24,6 | 10,4 | 13,50 | 4,43 |
| 225 kg ha ⁻¹ | 5.498 | 1.664 | 24,3 | 10,5 | 11,53 | 3,97 |
| Teste de Tukey | | | | | | |
| PP | | | | | | |
| 9.090 plantas ha ⁻¹ | 3.045 C | 931 C | 23,0 A | 10,3 A | 11,53 A | 3,70 A |
| 13.333 plantas ha ⁻¹ | 5.032 B | 1.452 B | 24,0 A | 10,2 A | 11,23 A | 3,89 A |
| 25.000 plantas ha ⁻¹ | 7.514 A | 2.209 A | 23,0 A | 10,6 A | 11,57 A | 4,42 A |

Legenda: Nas colunas médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “Teste Tukey” ($p < 0,05$).

Fonte: A autora (2026).

Em sistemas convencionais quando a população média é de 2.200 plantas ha⁻¹, a primeira colheita ocorre entre 24 e 36 meses após o plantio (WENDLING; SANTIN, 2015). No sistema experimental adensado apresentado deste estudo, o primeiro corte foi realizado apenas sete meses após o plantio, proporcionando antecipação do fluxo de caixa ao produtor, sendo considerada uma nova proposta de cultivo (EMBRAPA, 2024).

Essa precocidade de colheita está associada à combinação de alta densidade de plantio, manejo nutricional adequado e condições favoráveis de crescimento, que aceleram o estabelecimento vegetativo das plantas (GOULART et al., 2022).

Mantido o regime de duas colheitas anuais nesse sistema, a produtividade estimada ultrapassaria 15 t ha⁻¹ ano⁻¹, superando de forma expressiva a média nacional da cultura, estimada em 9.325 kg ha⁻¹ (IBGE, 2024), e contrastando com

sistemas tradicionais de cultivo, nos quais os intervalos entre colheitas geralmente variam entre 18 e 24 meses (GOULART et al., 2022). O que evidencia a alta capacidade de rebrota e acúmulo de biomassa da cultura sob manejo intensivo.

Em cultivos com alta densidade de plantas normalmente ocorre limitações ao crescimento das plantas associadas à competição intraespecífica, tais como disputa por luz, água ou nutrientes (HUBER et al., 2020), contudo, no presente estudo isso não foi verificado.

Compreender como as respostas fisiológicas se modificam diante do aumento da densidade do povoamento é essencial para definir estratégias de manejo eficientes para alcançar produtos de maior valor agregado e maior rentabilidade (GABIRA, 2022).

Esse modelo de cultivo requer um investimento inicial mais elevado em razão da elevada densidade de mudas por área, porém, a partir do quarto ano de implantação, passa a apresentar saldo financeiro positivo e, após aproximadamente oito anos, possibilita o retorno integral do capital investido, podendo ainda gerar lucro líquido anual até oito vezes superior ao obtido em sistemas convencionais (EMBRAPA, 2024).

Embora esses resultados indiquem elevado potencial econômico, é essencial que pesquisas avaliem a sustentabilidade agrônômica e ambiental desse sistema, verificando se tais retornos se mantêm em longo prazo e sob diferentes condições de cultivo (GABIRA, 2022; EMBRAPA, 2024).

Não foram observados efeitos significativos da adubação nitrogenada nem da interação entre doses de N e densidade de plantas sobre a produtividade de MFECOM de erva-mate (TABELA 4). Assim, nas condições edafoclimáticas e de manejo avaliadas, a variação na produtividade foi atribuída exclusivamente ao adensamento do cultivo.

Esse incremento significativo da produtividade na maior densidade de plantio, associado à ausência de resposta estatística às doses crescentes de N, indica que a organização espacial do dossel constituiu o principal fator determinante da produção de biomassa nas condições estudadas. Esses resultados sugerem que o arranjo populacional exerceu maior influência sobre a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa e o estabelecimento estrutural do dossel do que o suprimento externo de N durante o ciclo produtivo analisado.

Ao considerar isoladamente o fator Dose de N, verificou-se que a MFECOM variou de 4.512 a 5.921 kg ha⁻¹. Embora a análise de variância não tenha indicado efeito significativo das doses de N sobre a produtividade (TABELA 5), a média dos tratamentos com aplicação de N foi de 5.366 kg ha⁻¹, correspondendo a aumento aproximado de 18% em relação ao tratamento sem adubação nitrogenada. Esse comportamento indica uma tendência de resposta positiva ao fornecimento de N, entretanto, a magnitude da variabilidade experimental impediu a detecção de diferenças estatisticamente significativas ao nível de probabilidade adotado. Assim, nas condições avaliadas, o suprimento adicional de N pode ter contribuído para incrementos produtivos pontuais, porém sem evidência estatística robusta que sustente efeito consistente do nutriente sobre a produção de biomassa.

A produtividade de massa seca (MSECOM) apresentou comportamento semelhante, com valores médios numericamente 17% superiores nas plantas adubadas em comparação às não adubadas (TABELA 5). Apesar dessas variações, não foram detectadas diferenças significativas entre as doses avaliadas nem ajuste significativo de modelos de regressão, indicando que, dentro do intervalo de N estudado, o aumento no fornecimento do nutriente não promoveu incremento consistente na produtividade da cultura.

Os resultados de produtividade estão em consonância com os achados por Gabira (2022), que avaliou o mesmo experimento previamente. Contudo, o autor observou incremento de produtividade com o aumento das doses de N, com valor máximo de 9,4 t ha⁻¹ obtido com a aplicação de 300 % da dose de N recomendada.

Plantas mais eficientes na utilização de N conseguem manter altos níveis de crescimento e produtividade mesmo com menor aporte de fertilizantes (CHARDON; NOËL 2012; MASCLAUX-DAUBRESSE et al., 2010), se tornando de grande interesse, pois podem se desenvolver sob disponibilidade restrita de N (YANG et al., 2015), contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis (WENDLING et al., 2017), minimizando tanto os custos de produção quanto os impactos ambientais associados ao manejo inadequado desse nutriente (YANG et al., 2015).

Assim esse comportamento sugere que a aplicação de N no solo não foi um fator altamente limitante à produtividade na safra avaliada neste estudo, possivelmente em função do elevado teor de matéria orgânica do solo no local experimental, o que pode ter reduzido os efeitos dos tratamentos, considerando que

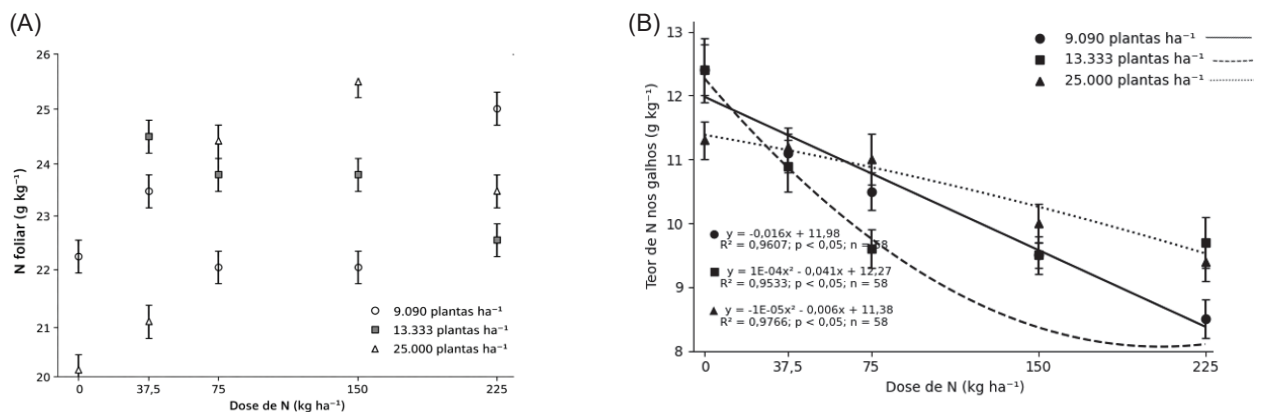
mesmo na dose de 0% de N as plantas não foram necessariamente submetidas ao déficit de N (PAULETTI; MOTTA, 2017; PAULETTI; SERRAT, 2025).

Em solos com essas características, a mineralização do N orgânico pode suprir a demanda das culturas, porém não sendo possível prever se o N será de fato mineralizado de acordo com a necessidade e estágio fisiológico da cultura, (PAULETTI; SERRAT, 2025), o que pode inclusive anular a resposta à adubação nitrogenada, conforme observado em experimentos de longo prazo, como o conduzido por Chiriac et al., (2025) ao avaliarem culturas anuais.

O teor de N nas folhas corrobora esse resultado, pois não variou com o aumento das doses do nutriente aplicado (FIGURA 2A), independentemente da densidade de plantio. Por outro lado, o teor de N nos galhos decresceu com o aumento das doses (FIGURA 2 B).

Na menor população de 9.090 plantas ha^{-1} , o efeito foi linear, enquanto nas densidades de 13.333 e 25.000 plantas ha^{-1} o comportamento foi melhor descrito por modelos quadráticos.

FIGURA 2 – TEOR DE NITROGÊNIO EM FOLHAS (A) E GALHOS (B) DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES DOSES NITROGÊNIO.



LEGENDA: Cada ponto representa a média dos tratamentos, e as barras de erro indicam o erro padrão da média.

Fonte: A autora (2026)

Com esses resultados, podemos verificar que nas condições do experimento, o teor de N foliar foi pouco responsivo ao incremento da adubação

nitrogenada, possivelmente em decorrência de mecanismos de redistribuição interna do nutriente, limitações fisiológicas da cultura ou efeitos compensatórios relacionados à densidade de plantio (FERNANDES et al., 2018; GABIRA et al., 2023; PAULETTI; SERRAT, 2025).

Entretanto, sob perspectiva de sustentabilidade de longo prazo, a manutenção dos elevados níveis de exportação de biomassa em sistemas adensados exige monitoramento contínuo do balanço nutricional do solo. A ausência de resposta imediata ao N não implica desnecessidade futura de reposição, especialmente considerando a grande exigência de extração principalmente acumulada ao longo de sucessivos ciclos.

A estimativa de N acumulado na fração comercial, variou de 21,1 a 29,2 kg ha⁻¹. Observou-se incremento na acumulação de N até a dose de 150 kg ha⁻¹, com posterior estabilização na maior dose testada, indicando saturação na eficiência da incorporação do nutriente na biomassa economicamente explorável em níveis elevados de adubação.

Em contraste, a redução do teor de N nos galhos com o aumento das doses da adubação, nos mostra priorização da alocação do nutriente para compartimentos metabolicamente mais ativos, especialmente folhas jovens, em detrimento de tecidos lenhosos, cuja função é predominantemente estrutural (FERNANDES et al., 2018).

Essa redução do teor de N nos galhos, com o incremento das doses de N pode ser explicada, predominantemente, pelo efeito de diluição decorrente do aumento da produção de biomassa em relação ao acúmulo proporcional de N nos tecidos (JARRELL; BEVERLY, 1981). Em sistemas perenes, a elevação da disponibilidade de N frequentemente estimula o crescimento vegetativo, como expansão foliar, alongamento de ramos e maior área foliar específica, promovendo incremento na matéria seca total (SANTIN et al., 2015).

Entretanto, a taxa de absorção e assimilação de N nem sempre acompanha na mesma magnitude o ganho estrutural, resultando em menor concentração do nutriente por unidade de massa. Esse fenômeno é classicamente descrito como efeito de diluição (JARRELL; BEVERLY, 1981), e está associado à dinâmica fonte-dreno e à redistribuição interna de N, especialmente sob condições em que o nutriente deixa de ser o principal fator limitante e outros elementos ou restrições fisiológicas passam a modular o crescimento (MARSCHNER, 2012).

Ademais, incrementos elevados de N podem alterar a partição de biomassa e a eficiência de uso do nutriente, reduzindo a concentração tecidual mesmo quando o acúmulo total é maior, conforme discutido por Lemaire et al. (2008) no contexto da relação crítica N e biomassa.

Assim, a diminuição do teor de N nos galhos com o aumento das doses reflete um ajuste ecofisiológico da planta entre crescimento estrutural e concentração nutricional, mais do que necessariamente uma limitação na absorção absoluta do nutriente.

Os teores de N observados neste estudo foram superiores aos reportados por Oliva et al., (2014), que registraram valores médios de 17,8 a 20,1 g kg⁻¹ nas folhas e cerca de 6,5 g kg⁻¹ nos galhos, diferença atribuída às maiores doses de N aplicadas em campo, sem que isso resultasse em incremento proporcional nos tecidos lenhosos, em razão da elevada mobilidade do nutriente e de sua alocação preferencial para órgãos de crescimento ativo (FERNANDES et al., 2018).

O estado nutricional da erva-mate é refletido diretamente na composição química de suas folhas, sendo o N o nutriente extraído em maior quantidade pela cultura, onde os teores foliares considerados adequados para a espécie situam-se na faixa de 24 a 36 g kg⁻¹. (PAULETTI; MOTTA, 2017).

No entanto, essa amplitude pode sofrer variações conforme o sistema de manejo e a idade fisiológica dos tecidos, em ervais nativos ou sob sistemas de baixa intensidade tecnológica, os teores comumente encontrados situam-se em patamares inferiores, com média de 21 g kg⁻¹ (LISBOA et al., 2024).

Estudos de calibração indicam que concentrações de N abaixo de 20 g kg⁻¹ resultam em restrições ao crescimento vegetativo e menor emissão de brotações, comprometendo a produtividade sustentável dos ervais (SANTIN et al., 2013).

Com relação aos teores de cafeína e teobromina nas folhas os mesmos não foram significativamente afetados pelos tratamentos, não sendo observados efeitos da adubação nitrogenada, da densidade populacional ou de sua interação ($p > 0,05$) (TABELA 4), o que indica estabilidade estatística na produção desses alcaloides nas condições avaliadas, mantendo estável a qualidade das metilxantinas.

Descritivamente, o teor de cafeína no tratamento sem adubação nitrogenada foi de 8,58 mg g⁻¹, enquanto a média dos tratamentos adubados com N foi de 12,12 mg g⁻¹ (TABELA 5), correspondendo a um incremento numérico de aproximadamente 41%, que, no entanto, não se traduziu em diferença estatística.

Essa variação observada no teor de cafeína com relação à adubação nitrogenada é condizente com o papel do N na biossíntese desse alcaloide, cuja formação está diretamente associada ao metabolismo nitrogenado das plantas, (FERNANDES et al., 2018; AGUIAR et al., 2023b).

Conforme demonstrado por Tomasi (2020), esse resultado evidencia a relação entre o suprimento de N e a síntese de compostos secundários nitrogenados, com implicações diretas na qualidade química da erva-mate, uma vez que o autor observou aumento nos teores de cafeína com a elevação das doses de N, em valores que variaram de 3 a 28,3 mg g⁻¹ a depender do genótipo.

Os teores de cafeína observados situam-se dentro da faixa reportada para folhas verdes de erva-mate, conforme dados de referência da Embrapa (2019), indicando consistência dos resultados e adequada representatividade experimental.

Portanto, a adubação nitrogenada não foi capaz extrapolar os limites usualmente descritos para a espécie, os quais apresentam variação natural em função das condições edafoclimáticas e de manejo (EMBRAPA, 2019; HAMMERSCHMIDT et al., 2024).

O teor médio de teobromina nas plantas sem adubação nitrogenada foi de 3,09 mg g⁻¹, enquanto a média dos tratamentos adubados foi de 4,23 mg g⁻¹ (TABELA 5), correspondendo a uma variação numérica de aproximadamente 36,9%, Alterações essas que, apesar de não detectadas estatisticamente, refletem o papel do N no metabolismo de alcaloides, amplamente descrito na literatura para a cultura da erva-mate (TOMASI, 2020).

Não foram observadas diferenças nos teores de cafeína e teobromina entre as diferentes densidades de plantas, As concentrações médias de cafeína foram de 11,23 a 11,57 mg g⁻¹, valores classificados como intermediários para a espécie, conforme critérios estabelecidos pela Embrapa (2019). De forma semelhante, os teores de teobromina variaram de 3,70 a 4,42 mg g⁻¹, situando-se dentro da faixa reportada por Benedito et al., (2023).

Com esses resultados é possível verificar que o aumento da densidade populacional não altera a síntese das metilxantinas nas folhas, mantendo os teores de cafeína e teobromina mesmo sob sistemas de cultivo mais adensados.

É relevante destacar que não foram observados indícios de supressão competitiva na maior densidade avaliada, o que sugere que o limiar crítico de competição por luz, água ou nutrientes ainda não foi atingido nas condições do

experimento. Esse resultado tem implicações práticas importantes, pois demonstra que a intensificação por meio do adensamento pode elevar significativamente a produtividade sem exigir incremento proporcional no aporte de N e sem comprometer a qualidade química das folhas.

Essa estabilidade nos mostra que o metabolismo secundário da erva-mate apresenta resiliência fisiológica à competição, preservando a qualidade fitoquímica independentemente do número de plantas por área. Além disso, não foi observada interação significativa entre os fatores, reforçando que a concentração destes compostos é pouco influenciada pelo manejo relacionado à adubação nitrogenada e população de plantas.

No que se refere aos compostos secundários, Melo et al., (2020) destacam que os derivados do ácido cafeoilquínico, como os ácidos 3-cafeoilquínico, 4-cafeoilquínico e 5-cafeoilquínico, constituem os principais compostos presentes no tecido foliar da erva-mate e estão diretamente associados à elevada capacidade antioxidante da bebida.

Estudos recentes demonstram que esses compostos exercem efeitos anti-inflamatórios e atuam na modulação do metabolismo da glicose e dos lipídios, contribuindo para a redução do estresse oxidativo e para benefícios à saúde metabólica (CROGE et al., 2020).

O teor foliar de alguns destes ácidos foram influenciados pela aplicação de diferentes doses de N (TABELA 6). A densidade de plantas não proporcionou o mesmo efeito, e não houve interação significativa entre os fatores adubação nitrogenada e densidade populacional para nenhum dos ácidos cafeoilquínicos analisados.

TABELA 6 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE TEORES DE COMPOSTOS FENÓLICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DOSEN) E POPULAÇÕES DE PLANTAS (PP).

| Testes | 3-CQA (mg,g ⁻¹) | 5-CQA (mg,g ⁻¹) | 4-CQA (mg,g ⁻¹) | 3,5-DCQ (mg,g ⁻¹) | 3,4-DCQ (mg,g ⁻¹) | 4,5-DCQ (mg,g ⁻¹) |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Normalidade ¹ | | | | | | |
| SW | 0,5674 | 0,7984 | 0,8851 | 0,9931 | 0,2815 | 0,4917 |

| | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Homogeneidade - Bartlett ² | | | | | | |
| Doses de N | 0,813 | 0,086 | 0,281 | 0,252 | 0,548 | 0,792 |
| População de plantas (PP) | 0,204 | 0,756 | 0,925 | 0,104 | 0,350 | 0,332 |
| Interação (DoseN x PP) | 0,849 | 0,395 | 0,891 | 0,146 | 0,817 | 0,861 |
| Anova ³ | | | | | | |
| Doses de N | 2,76 ^{NS} | 5,79 ^{**} | 3,64 ^{**} | 8,43 ^{**} | 4,62 ^{**} | 10,88 ^{**} |
| População de plantas (PP) | 1,63 ^{NS} | 0,48 ^{NS} | 1,88 ^{NS} | 0,61 ^{NS} | 1,58 ^{NS} | 2,33 ^{NS} |
| Interação (DoseN x PP) | 1,28 ^{NS} | 0,85 ^{NS} | 0,88 ^{NS} | 1,62 ^{NS} | 1,45 ^{NS} | 1,61 ^{NS} |
| Coeficiente de Variação (%) | | | | | | |
| Resíduo A | 15,19 | 8,20 | 9,89 | 18,33 | 29,56 | 24,65 |
| Resíduo B | 12,84 | 10,59 | 10,84 | 19,73 | 19,48 | 18,86 |

Legenda: ¹ SW – Teste de Shapiro Wilk: ($p \leq 0,05$) dados não normais e ($p > 0,05$) dados normais, ² Teste de Bartlett: ($p \leq 0,05$) dados não homogêneos e ($p > 0,05$) dados homogêneos, ³ Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; ($p < 0,05$) e ^{**} ($p < 0,01$) significativo.

FONTE: A Autora (2026)

Os teores de ácidos cafeoilquínicos observados neste estudo (TABELA 7) foram superiores aos valores reportados por Aguiar et al., (2023a), que relataram concentrações próximas a 90 mg g^{-1} para a soma de 3-CQA, 4-CQA e 5-CQA, Essa diferença pode ser atribuída, ao menos em parte, às características das plantas avaliadas, como idade e porte no período de colheita (TOMASI, 2020), visto que Aguiar et al., (2023a) colheu plantas em estágio inicial de desenvolvimento.

TABELA 7 - TEORES DOS ÁCIDOS CAFEOLQUINICOS EM FOLHAS DE ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DOSEN) E POPULAÇÃO DE PLANTAS (PP).

| Testes | 3-CQA (mg.g ⁻¹) | 5-CQA (mg.g ⁻¹) | 4-CQA (mg.g ⁻¹) | 3,5-DCQ (mg.g ⁻¹) | 3,4-DCQ (mg.g ⁻¹) | 4,5-DCQ (mg.g ⁻¹) |
|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| DoseN | | | | | | |
| 0 kg ha ⁻¹ | 39,14 | 80,01 | 62,93 | 23,65 | 19,80 | 25,07 |
| 37,5 kg ha ⁻¹ | 34,70 | 80,81 | 59,79 | 23,37 | 17,89 | 23,25 |
| 75 kg ha ⁻¹ | 32,61 | 70,08 | 55,18 | 20,38 | 16,12 | 17,57 |
| 150 kg ha ⁻¹ | 36,84 | 75,00 | 57,21 | 26,78 | 20,52 | 30,28 |
| 225 kg ha ⁻¹ | 38,77 | 78,00 | 59,04 | 30,46 | 25,86 | 32,76 |
| PP | | | | | | |
| 9,090 plantas ha ⁻¹ | 35,84 A | 78,40 A | 59,27 A | 24,87 A | 21,06 A | 26,22 A |
| 13,333 plantas ha ⁻¹ | 37,97 A | 77,97 A | 60,79 A | 25,85 A | 20,19 A | 27,24 A |
| 25,000 plantas ha ⁻¹ | 35,43 A | 75,84 A | 56,43 A | 24,07 A | 18,87 A | 23,90 A |

Legenda: CQA: ácido cafeoilquínico; DCQ: ácido dicafeoilquínico, Nas colunas médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “Teste Tukey” ($p < 0,05$),

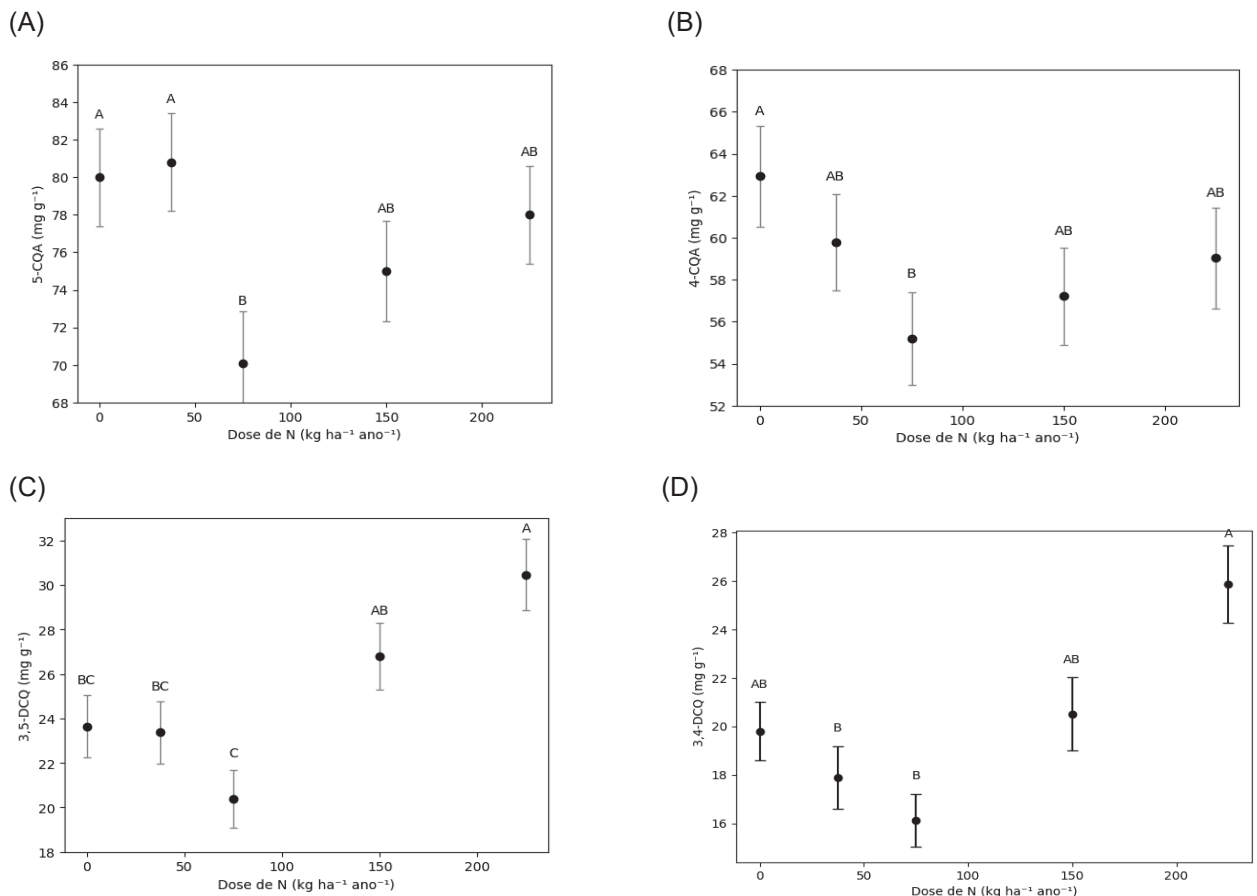
FONTE: A Autora (2026)

Enquanto estudos prévios com erva-mate registraram teores de 5-CQA entre aproximadamente 40 e 65 mg g^{-1} (TOMASI, 2020; BLUM-SILVA et al., 2015), neste estudo os valores de 5-CQA atingiram até 80 mg g^{-1} , além de elevados teores de diCQAs (TABELA 7), evidenciando que os valores observados situam-se no limite superior ou acima da faixa normalmente reportada na literatura.

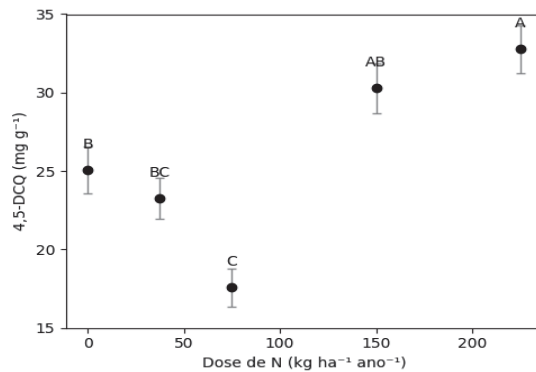
O aumento dos teores foliares dos ácidos 3,5 DCQ (FIGURA 3C), 3,4-DCQ (FIGURA 3D) e 4,5 DCQ (FIGURA 3E) nas doses mais altas de N, nos mostra que a disponibilidade deste nutriente eleva a rota biossintética desses compostos.

Por outro lado, os teores dos compostos 5-CQA e 4-CQA diminuíram de forma geral nas doses intermediárias N (FIGURA 3A e 3B).

FIGURA 3 - INFLUÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NOS ÁCIDOS CAFEOLQUÍNICOS NA ERVA-MATE, (A) 5-CQA - ÁCIDO CLOROGÊNICO; (B) 4-CQA ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO; (C) 3,5-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO; (D) 3,4-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO; (E) 4,5-DCQ - ÁCIDO DICAFEOLQUINICO.



(E)



LEGENDA: Cada ponto representa a média dos tratamentos, e as barras indicam o erro padrão da média. Letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: A Autora (2026)

A resposta contrastante entre os teores de ácidos monocateoilquínicos e dicafeoilquínicos (diCQA), sugere uma alteração no perfil de compostos fenólicos associada à adubação nitrogenada. De acordo com Tomasi (2020), ambos os grupos pertencem à classe dos ácidos cafeoilquínicos e compartilham rotas biossintéticas comuns, sendo formados por reações de esterificação entre o ácido quínico e o ácido cafeico. No entanto, a autora descreve variações nos teores relativos desses compostos em função do manejo nutricional.

Isso se justifica pelo fato de as plantas apresentarem um mecanismo regulatório complexo, que coordena a assimilação de N com o metabolismo do Carbono, uma vez que o N regula a expressão de genes envolvidos nessas rotas metabólicas (VIDAL; GUTIÉRREZ, 2008; NUNES-NESI; FERNIE; STITT, 2010).

Do ponto de vista da qualidade da matéria-prima, essa alteração é considerada positiva e representa um ganho no valor funcional da erva-mate, uma vez que os diCQA, apresentam elevada capacidade antioxidantes e efeitos metabólicos benéficos associados à modulação da função mitocondrial, conforme demonstrado em modelos celulares (TORRES et al., 2021). Dessa forma, a adubação nitrogenada, atuou como um modulador químico que refina o perfil de compostos bioativos da planta.

Apesar de estudos anteriores indicarem maiores teores de ácidos cafeoilquínicos em colheitas de inverno, os elevados valores observados neste estudo, conduzido com colheita no verão, sugerem que fatores adicionais ao período

de colheita, como o manejo, podem influenciar a síntese desses compostos, (HAMMERSCHMIDT et al., 2024; TOMASI, 2020).

O estudo de Aquino; Falcão; Almeida-Cortez (2017) com plantas de *Aspidosperma pyrifolium Mart*, submetidas a diferentes disponibilidades de recursos demonstrou que a síntese de metabólitos secundários varia conforme a disponibilidade de N e a competição intraespecífica. Em condições de maior disponibilidade de N, plantas tiveram maior capacidade biossintética, no entanto, quando submetidas a elevado estresse biótico por competição, houve redirecionamento de carbono e N para rotas secundárias, aumentando a produção dos compostos como mecanismo de defesa.

Diante disso, os resultados indicam que a DoseN e o aumento da competição entre plantas proporcionam respostas distintas em função do local de cultivo e espécie cultivada (TOMASI, 2020; DUARTE et al., 2022; HAMMERSCHMIDT et al., 2024). No entanto, em erva-mate, os efeitos observados neste trabalho são atribuídos à adubação nitrogenada, sem alterações nos teores de cafeína e teobromina, com aumento dos diCQA melhorando a qualidade para esses compostos antioxidantes. A ausência de efeito do aumento da população de plantas não foi determinante para alterar a qualidade da erva-mate.

3.2 EXPERIMENTO 2 - CULTIVARES CLONAIIS DE ERVA-MATE E ADUBAÇÃO NITROGENADA

Os dados foram submetidos inicialmente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Todos os valores de p obtidos foram superiores a 0,05, indicando distribuição normal dos dados.

A ANOVA não revelou efeito da interação entre os fatores clone e DoseN (TABELA 8), O fator clone apresentou efeito altamente significativo ($p < 0,01$) na produtividade de MFECOM e MSECOM, teor de N foliar, cafeína e teobromina nas folhas (TABELA 8), evidenciando a influência do material genético tanto sobre o crescimento vegetativo quanto sobre a composição química da erva-mate. No entanto, não houve efeito sobre as massas frescas e secas dos galhos grossos (MFGG e MSGG), sugerindo que essas variáveis são menos sensíveis às diferenças entre clones.

TABELA 8 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DA PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA (MFECOM) E SECA (MSECOM) DE ERVA-MATE COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) E DE MASSA FRESCA (MFGG) E SECA (MSGG) DE GALHOS GROSSOS, TEOR DE NITROGÊNIO (NFOLHAS) E DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS DE ERVA-MATE DE DIFERENTES CLONES SUBMETIDOS A DOSES DE NITROGÊNIO, APÓS SEIS ANOS DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO A CAMPO, EM GENERAL CARNEIRO – PR.

| Testes | MFECOM (kg,ha ⁻¹) | MSECOM (kg,ha ⁻¹) | MFGG (kg,ha ⁻¹) | MSGG (kg,ha ⁻¹) | N Foliar (g,kg ⁻¹) | Cafeína (mg,g ⁻¹) | Teobromina (mg,g ⁻¹) |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Normalidade ¹ | | | | | | | |
| SW | 0,382 | 0,4345 | 0,7485 | 0,9564 | 0,8106 | 0,321 | 0,556 |
| Homog, - Bartlett ² | | | | | | | |
| Clone | 0,725 | 0,251 | 0,086 | 0,803 | 0,403 | 0,667 | 0,060 |
| Dose de N | 0,060 | 0,550 | 0,071 | 0,882 | 0,463 | 0,279 | 0,465 |
| Int, (Dose N x Clone) | 0,429 | 0,357 | 0,062 | 0,162 | 0,686 | 0,489 | 0,436 |
| Anova ³ | | | | | | | |
| Clone | 17,10** | 61,17** | 2,81 ^{NS} | 2,11 ^{NS} | 114,74** | 82,83** | 124,71** |
| Dose de N | 4,72** | 3,73** | 1,48 ^{NS} | 2,46 ^{NS} | 3,452** | 1,39 ^{NS} | 1,95 ^{NS} |
| Interação (Clone x Dose N) | 1,33 ^{NS} | 1,52 ^{NS} | 1,72 ^{NS} | 1,13 ^{NS} | 0,99 ^{NS} | 1,81 ^{NS} | 1,65 ^{NS} |
| Coefic. Variação (%) | | | | | | | |
| Resíduo A | 28,23 | 18,39 | 44,73 | 43,09 | 4,52 | 38,74 | 26,61 |
| Resíduo B | 34,10 | 32,64 | 45,80 | 49,85 | 7,92 | 15,39 | 24,99 |

Legenda: ¹ SW – Teste de Shapiro Wilk: ($p \leq 0,05$) dados não normais e ($p > 0,05$) dados normais, ² Teste de Bartlett: ($p \leq 0,05$) dados não homogêneos e ($p > 0,05$) dados homogêneos, ³ Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; ($p < 0,05$) e ** ($p < 0,01$) significativo.

FONTE: A Autora (2026)

O fator DoseN também proporcionou efeito significativo ($p < 0,01$) sobre a MFECOM, MSECOM e teor foliar de N. Por outro lado, os teores de cafeína e teobromina não foram influenciados, sugerindo que a síntese das metilxantinas é mais estável geneticamente e menos influenciada pelo manejo nutricional de N.

Diferenças significativas foram observadas entre os clones para a maioria das variáveis morfológicas e fitoquímicas avaliadas, conforme demonstrado na Tabela 9. Não foram observadas diferenças entre os clones para a MFGG e MSGG, esse efeito da variabilidade genética sobre características produtivas e químicas da erva-mate, se torna relevante na definição de estratégias de manejo e seleção clonal conforme os objetivos do cultivo.

TABELA 9 - PRODUTIVIDADE DA MASSA FRESCA (MFECOM) E SECA (MSECOM) DE ERVA-MATE COMERCIAL (FOLHAS + GALHOS FINOS ATÉ 7 MM) E DE MASSA FRESCA (MFGG) E SECA (MSGG) DE GALHOS GROSSOS, TEOR DE NITROGÊNIO (N FOLHAS) E DE CAFEÍNA E TEOBROMINA NAS FOLHAS DE DIFERENTES CLONES DE ERVA-MATE, APÓS SEIS ANOS DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO A CAMPO, EM GENERAL CARNEIRO – PR,

| Teste de Tukey | MFECOM (Kg.ha ⁻¹) | MSECOM (Kg.ha ⁻¹) | MFGG (Kg.ha ⁻¹) | MSGG (Kg.ha ⁻¹) | N Foliar (g.kg ⁻¹) | Cafeína (mg.g ⁻¹) | Teobromina (mg.g ⁻¹) |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Clone | | | | | | | |
| Yari | 12.520 A | 4.700 A | 5.430 A | 2.390 A | 24.44 B | 5.60 B | 7.14 A |
| Aupaba | 8.840 B | 3.800 B | 4.240 A | 1.970 A | 29.55 A | 16.29 A | 2.57 B |

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: A autora (2026)

A produtividade de MFECOM da cultivar Yari superou a média nacional de 9,325 kg ha⁻¹ (IBGE, 2024), enquanto a cultivar Aupaba apresentou desempenho inferior a esse referencial. A superioridade produtiva do clone Yari, com incremento de aproximadamente 41,6% em relação ao Aupaba, reflete seu maior potencial genético para acúmulo de parte aérea e rápido crescimento vegetativo, características associadas ao processo de seleção clonal voltado ao elevado rendimento produtivo (WENDLING et al., 2017).

A produtividade de MFECOM tanto pra Yari como pra Aupaba encontrada neste estudo, foram superiores à produtividade média de 7,3 t ha⁻¹ reportada por produtores de erva-mate em 470 propriedades rurais distribuídas na região produtora do Brasil (GOULART et al., 2022). Esta diferença reforça o potencial da seleção de plantas e multiplicação vegetativa como estratégia eficiente para o aumento da produtividade da cultura.

A maior produtividade observada no clone Yari, independentemente da dose de N, pode estar associada a características morfofisiológicas previamente descritas para esse material (WENDLING et al., 2017). Atributos que favorecem maior interceptação luminosa e potencial fotossintético, o que, aliado ao adequado suprimento de N, contribui para maior acúmulo de biomassa, Resultados semelhantes foram relatados por Floss et al., (2022), que observaram diferenças significativas de produtividade entre genótipos de erva-mate sob condições

nutricionais controladas, reforçando a importância da escolha do material genético no manejo da cultura.

A produtividade de MSECUM também foi maior no clone Yari, com um incremento de 23,7%, diferença menor que o observado na MFECUM. A menor diferença observada entre os clones para a MSECUM, quando comparada à MFECUM, não está associada ao conteúdo hídrico do material colhido, uma vez que o clone Aupaba apresentou maior teor de umidade, com 42%, do que o clone Yari, que atingiu 37%. O que nos mostra que a superioridade produtiva de Yari não decorre de maior retenção de água nos tecidos, mas sim de maior produção efetiva de biomassa estrutural.

A concentração de cafeína no clone Aupaba foi aproximadamente 2,9 vezes superior à observada no clone Yari, evidenciando uma diferença de grande magnitude entre os materiais. Esse contraste indica que o acúmulo de cafeína na erva-mate não é determinado apenas por fatores de manejo, mas está fortemente associado a base genética. Resultados semelhantes foram descritos por Reissmann et al., (2014), que apontam que as variações nos teores de cafeína e teobromina entre genótipos de *Ilex paraguariensis* decorrem principalmente da procedência genética e de condições edáficas específicas, mais do que da nutrição mineral isolada.

Nesse contexto, a superioridade do clone Aupaba em relação a Yari sugere um potencial intrínseco para produção de folhas com maior teor de metilxantinas, independentemente de ajustes pontuais de adubação.

Os teores mais altos de cafeína nas folhas conferem ao clone Aupaba características estimulantes mais pronunciadas ao produto final. Nesse contexto, o clone Yari apresenta maior adequação para a produção de erva-mate destinada a consumidores que buscam menor ingestão de cafeína, ao passo que o clone Aupaba atende a nichos de mercado que valorizam maior potencial estimulante. Deste modo, a escolha do cultivar clonal constitui um fator determinante na modulação da composição química da erva-mate, permitindo direcionar a produção conforme demandas específicas do mercado consumidor.

Os valores de cafeína encontrados neste trabalho, situam-se dentro da faixa reportada por Benedito et al., (2023), no qual observaram variações de 0,35 a 23,85 mg g⁻¹ entre 55 genótipos ao longo de quatro anos, demonstrando coerência com a ampla variabilidade natural existente na espécie.

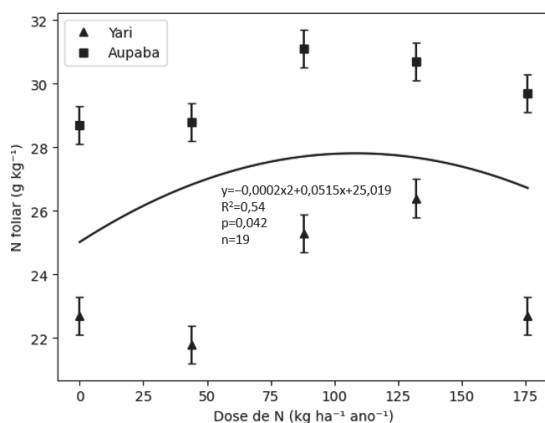
Além disso, observam-se valores inversamente proporcionais entre cafeína e teobromina (TABELA 9), relação também relatada por Benedito et al., (2023), que verificaram teores de teobromina variando entre 0 e 5 mg g⁻¹, faixa próxima à encontrada no presente estudo. Esta inversão nos teores destes compostos também foi relatada por Duarte et al., (2022) o que reforça a hipótese de compartilhamento de vias metabólicas entre os dois alcaloides, em que a predominância de um composto tende a limitar a síntese do outro, característica de plantas do gênero *Ilex* (ASHIHARA et al., 2007; REGINATTO et al., 1999).

Benedito et al., (2023) ao analisarem genótipos cultivados sob condições controladas, evidenciam que variação da composição fitoquímica da espécie é fortemente influenciada pela origem clonal, o que possibilita a seleção de genótipos com características específicas voltadas à produção e à qualidade industrial, assim como neste trabalho.

O teor de N foliar foi influenciado pelas doses de N aplicadas ao solo, enquanto a interação entre clone e dose de N não foi significativa ($p > 0,05$). Dessa forma, o efeito da adubação nitrogenada sobre o N foliar foi descrito por um modelo de regressão ajustado a partir da média dos dois clones avaliados.

A relação entre o teor de N foliar e as doses de N foi representada por um modelo quadrático (FIGURA 4), caracterizando uma resposta típica de saturação dos mecanismos de absorção e assimilação de N (FERNANDES et al., 2018).

FIGURA 4 - TEOR DE NITROGÊNIO EM FOLHAS DOS CLONES AUPABA E YARI DE ERVA-MATE EM FUNÇÃO DAS DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS NA ADUBAÇÃO.



LEGENDA: Cada ponto representa a média dos tratamentos, e as barras de erro indicam o erro padrão da média. As linhas correspondem ao ajuste de regressão polinomial de segundo grau, quando significativo.

Fonte: A Autora (2026)

Os teores de N foliar observados neste estudo, considerando a média dos clones, variaram de 25,3 a 28,6 g kg⁻¹, situando-se próximos ao limite superior da faixa considerada adequada para a cultura da erva-mate, e acima dos valores reportados por Lisboa et al., (2024), que, ao avaliarem 167 amostras foliares, observaram teor médio de 21,5 g·kg⁻¹ de N foliar.

Na comparação entre materiais genéticos, Yari apresentou maior capacidade de conversão do N absorvido em biomassa, ao passo que Aupaba exibiu maior concentração de N foliar associada a menor produção de massa seca.

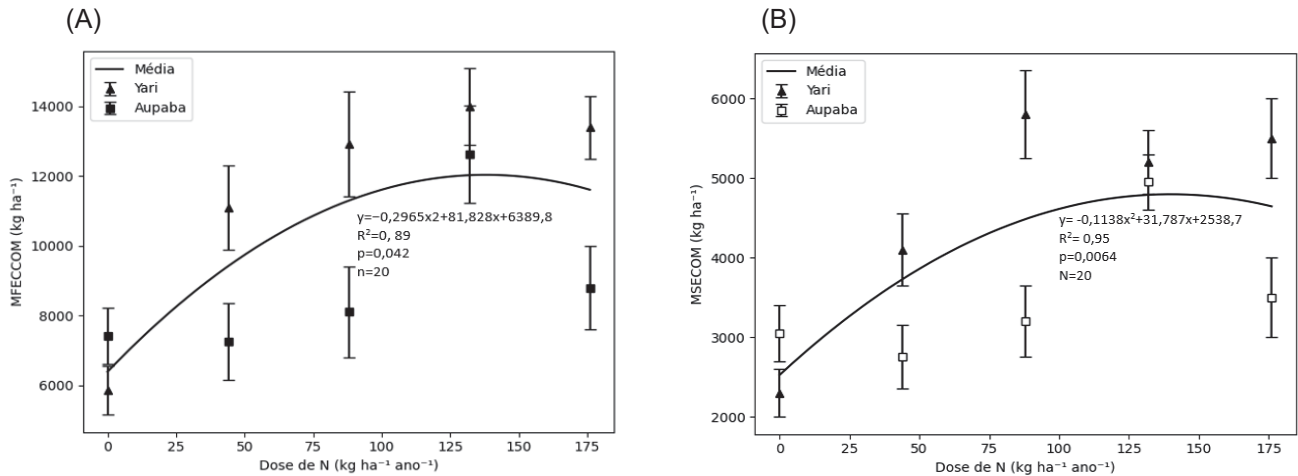
A acumulação estimada de N na biomassa comercial diferiu pouco entre os clones, atingindo aproximadamente 114,9 kg ha⁻¹ no clone Yari e 112,3 kg ha⁻¹ no clone Aupaba. Embora Aupaba tenha apresentado maior concentração foliar de N, o maior acúmulo de massa seca comercial observado em Yari compensou essa diferença, resultando em valores semelhantes de N acumulado por unidade de área.

Esse resultado nos mostra que a quantidade total de N incorporada à biomassa é função conjunta da concentração do nutriente e do acúmulo de matéria seca, e não apenas do teor foliar isoladamente. Tal padrão está alinhado com o conceito de curva de diluição de N descrito por Lemaire et al. (2008), segundo o qual a concentração de N nos tecidos vegetais declina conforme o aumento da biomassa, refletindo a dinâmica entre a demanda metabólica e o acúmulo de tecidos estruturais.

Assim, diferenças genotípicas na produtividade podem modular a exportação potencial de N mesmo quando os teores foliares indicam contrastes significativos entre clones.

A análise de variância não indicou efeito da interação entre clone e dose de N para as variáveis de produtividade avaliadas (TABELA 8), demonstrando que os clones responderam de forma semelhante ao incremento das doses de N (FIGURA 5).

FIGURA 5 - PRODUTIVIDADE DE MASSA FRESCA (MFECOM) (A) E SECA (MSECOM) (B) COMERCIAL DE ERVA-MATE, EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO.



LEGENDA: Os símbolos representam as médias dos tratamentos, e as barras de erro correspondem ao erro padrão da média, A linha contínua indica o ajuste de regressão polinomial de 2º grau, obtido a partir da média dos clones.

Fonte: A Autora (2026)

O ajuste quadrático observado para a produtividade em função das doses de N determinou a máxima resposta nas doses de 138 e 140 kg ha⁻¹ de N, para MFECOM e MSECOCM, respectivamente.

Esse comportamento é coerente com princípios fisiológicos amplamente descritos, nas quais o suprimento adicional de N acima de determinado limiar não resulta em incremento proporcional de crescimento, em função de limitações metabólicas e de alocação interna do nutriente (FERNANDES et al., 2018; PAULETTI; SERRAT, 2025), Assim, a resposta observada nos mostra que os clones atingiram um patamar de saturação fisiológica para crescimento vegetativo dentro da faixa de doses avaliada.

O incremento significativo da MFECOM e da MSECOCM com o aumento das doses de N nos mostra que os clones avaliados apresentaram grande capacidade de converter o suprimento adicional de N em biomassa comercial, evidenciando que, mesmo em solos com alto teor de matéria orgânica, a mineralização do N orgânico não foi suficiente para suprir plenamente a demanda da cultura nas condições avaliadas (PAULETTI; SERRAT, 2025).

Esse comportamento corrobora a hipótese de que materiais geneticamente selecionados apresentam elevada eficiência fisiológica no uso do nutriente. Uma possível explicação reside nas diferenças morfofuncionais do sistema radicular, visto

que mudas propagadas vegetativamente tendem a apresentar menor desenvolvimento de raiz pivotante e maior proporção de raízes adventícias e finas, o que potencialmente amplia a área superficial de absorção e resulta em maior eficiência de aquisição de nutrientes em comparação a mudas de origem seminal (Wendling et al., 2017; Aguiar et al., 2023).

A ausência de interação entre clone \times doseN demonstra que o padrão de resposta ao N é conservado entre os materiais avaliados, mostrando que o N atua como fator dominante do crescimento vegetativo independentemente do material clonal. Esse resultado reforça o manejo nitrogenado como elemento chave para o incremento da produtividade da cultura.

Sob a dose de 88 kg ha⁻¹ de N, correspondente a aproximadamente 100% da recomendação oficial proposta por Pauletti e Motta (2017), a produtividade da MFECOM foi de 11,295 kg ha⁻¹. Entretanto, o aumento da dose para 138 kg ha⁻¹ de N ano⁻¹ (\approx 150% da dose recomendada) resultou em incremento produtivo de 740 kg ha⁻¹, atingindo 12,035 kg ha⁻¹. Esses resultados indicam que, nas condições específicas avaliadas e para material clonal, há margem de resposta produtiva acima da recomendação oficial, sem evidências de consumo de luxo ou redução da eficiência agrônômica do N.

Nesse contexto, a dose de 138 kg ha⁻¹ de N configura-se como um limite técnico superior vantajoso, sem evidências de consumo de luxo ou redução da eficiência agrônômica do N. Esse comportamento pode ser explicado sob a ótica da fisiologia da produção, uma vez que, conforme a Lei dos Incrementos Decrescentes de Mitscherlich, o aumento da disponibilidade de nutrientes promove ganhos produtivos progressivamente menores após determinado limiar, resultando em tendência de estabilização e posterior decréscimo da resposta (GOMES; MALAVOLTA, 1949).

Quando comparado ao tratamento sem adubação nitrogenada, cuja produtividade foi de 6.390 kg ha⁻¹ de MFECOM, o fornecimento de 88 kg ha⁻¹ de N aumentou em quase 80% a produtividade da cultura (11.295 kg ha⁻¹), representando incremento absoluto de 4.905,2 kg ha⁻¹. A elevação adicional da dose para 138 kg ha⁻¹ de N promoveu novo ganho produtivo de 740 kg ha⁻¹, atingindo 12.035 kg ha⁻¹. Do ponto de vista agrônômico, isso nos mostra elevada responsividade do material

clonal ao N, sobretudo na transição entre ausência de adubação e adubação recomendada.

Sob a perspectiva econômica, a diferença entre 88 e 138 kg ha⁻¹ de N corresponde a 50 kg ha⁻¹ adicionais de N. Considerando ureia (45% de N) como fonte, seriam necessários aproximadamente 111 kg ha⁻¹ de fertilizante. Admitindo custo médio de R\$ 3,00 kg⁻¹ de ureia, o investimento adicional seria da ordem de R\$ 333 ha⁻¹. O incremento produtivo associado (740 kg ha⁻¹), assumindo valor conservador de R\$ 1,00 kg⁻¹ de massa foliar, resultaria em receita bruta adicional de R\$ 740 ha⁻¹, gerando saldo positivo aproximado de R\$ 407 ha⁻¹.

Quando se considera o contraste extremo entre ausência de adubação e 138 kg ha⁻¹ de N, o incremento total de 5.645,2 kg ha⁻¹ de MFECOM, o que reforça ainda mais a magnitude do efeito do N sobre o sistema produtivo. Mesmo sob cenário conservador de preços, a resposta econômica marginal permanece favorável. Esses resultados sustentam que, em sistemas clonais, a intensificação nitrogenada acima da recomendação oficial pode ser tecnicamente justificável e economicamente viável.

A produção MFECOM em resposta à adubação nitrogenada, pode variar de acordo com o genótipo, práticas de manejo e condições de cultivo (GOULART, et al., 2022). Estudos clássicos de adubação em erva-mate já demonstraram aumento de produtividade com reposição de N, embora nem sempre com resposta linear (SANTIN et al., 2015). Em estudo conduzido em Latossolo Vermelho-Escuro, Lourenço et al., (1997) observaram que a exportação contínua de biomassa pela colheita exige reposição regular de nutrientes, sendo a adubação nitrogenada associada a incrementos na produção.

No que tange à fração lenhosa não comercial, os galhos grossos (GG), as análises não revelaram diferenças significativas entre os genótipos ou em resposta às doses de N ($p > 0,05$).

A resposta significativa das doses de N para a MFECOM, associada à ausência de efeito para GG, evidencia alteração na alocação relativa de biomassa entre compartimentos vegetativos. Esse incremento da fração comercial sem resposta concomitante da biomassa de GG indica que o N atuou preferencialmente sobre tecidos metabolicamente ativos e estruturalmente menos lignificados, estimulando emissão de brotações e expansão foliar, sem promover incremento proporcional do crescimento lenhoso estrutural.

Como consequência, a relação MFECOM/GG foi modificada ao longo do gradiente de doses, refletindo mudança na eficiência de conversão da biomassa total em produto comercial no intervalo avaliado.

Cabe destacar que, no presente estudo, o intervalo de colheita foi de 18 meses, fator que exerce influência direta sobre a dinâmica de partição de biomassa. Conforme demonstrado por Santin et al. (2019), o aumento do intervalo entre colheitas favorece o acúmulo de biomassa estrutural, com incremento expressivo da fração de GG, reduzindo proporcionalmente a participação da fração comercial. Assim, o período de 18 meses pode ter limitado o acúmulo de GG e potencializado a expressão do efeito do N sobre a MFECOM, contribuindo para a alteração observada na relação MFECOM/GG.

Sob a perspectiva ecofisiológica, o suprimento nitrogenado tende a intensificar a atividade meristemática, a formação de tecidos fotossinteticamente ativos e a expansão foliar (SANTIN et al., 2013; PAULETTI; SERRAT, 2025), promovendo maior alocação de carbono para compartimentos de renovação rápida em detrimento da biomassa estrutural permanente.

Desse modo, a modificação da relação MFECOM/GG demonstra que o manejo nitrogenado, associado ao regime de colheita, não apenas incrementa a produtividade absoluta do material comercial, mas também redefine o padrão de partição de biomassa da planta, com implicações diretas na eficiência produtiva e no sistema de produção de erva-mate.

Os rendimentos de GG observados neste estudo posicionam-se significativamente abaixo dos reportados por Santin et al., (2015), que constataram produções superiores a 10 t ha^{-1} em ervais com patamares de produtividade foliar semelhantes. Essa menor alocação relativa de biomassa para GG nos mostra uma arquitetura de copa mais eficiente nos materiais genéticos avaliados, onde uma maior proporção do N absorvido é convertida em MFECOM.

No que diz respeito aos compostos secundários, a normalidade dos resíduos foi confirmada pelo teste de Shapiro–Wilk ($p > 0,05$) para todas as variáveis avaliadas. A homogeneidade das variâncias também foi verificada pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$), indicando adequação dos pressupostos do modelo estatístico tanto para os fatores principais (clone e DoseN) quanto para a interação entre eles.

Também não houve interação ($p > 0,05$) entre os fatores clones e DoseN, tampouco efeito isolado de clone para o teor dos ácidos cafeoilquínicos avaliados.

No entanto, a adubação nitrogenada exerceu efeito sobre os teores de 5-CQA, 4-CQA e 3,5-diCQA (Tabela 10), nos revelando que a disponibilidade de N no solo modula ativamente a síntese desses compostos fenólicos na erva-mate. Para os demais compostos (3-CQA, 3,4-diCQA e 4,5-diCQA), os valores de F observados foram inferiores ao nível crítico, indicando que as variações detectadas encontram-se dentro da variabilidade do experimento (NS),

TABELA 10 – ANÁSE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE TEOR NAS FOLHAS DE ERVA-MATE DOS ÁCIDOS CCAFEOLQUINICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO (DoseN) E MATERIAIS CLONAIIS.

| Testes | 3-CQA (mg,g) | 5-CQA (mg,g) | 4-CQA (mg,g) | 3,5-diCQA (mg,g) | 3,4-diCQA (mg,g) | 4,5-diCQA (mg,g) |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Normalidade ¹ SW | 0,5429 | 0,3835 | 0,2359 | 0,1171 | 0,8411 | 0,991 |
| Homogeneidade Bartlett ² | | | | | | |
| Clone | 0,069 | 0,401 | 0,366 | 0,834 | 0,115 | 0,548 |
| DoseN | 0,204 | 0,922 | 0,657 | 0,171 | 0,729 | 0,442 |
| Int, (Clone x DoseN) | 0,461 | 0,981 | 0,872 | 0,06 | 0,614 | 0,457 |
| Anova ³ | | | | | | |
| DoseN | 0,96 ^{NS} | 3,49 ^{**} | 5,24 ^{**} | 2,62 ^{**} | 0,96 ^{NS} | 0,57 ^{NS} |
| Clone | 1,15 ^{NS} | 1,29 ^{NS} | 0,01 ^{NS} | 1,68 ^{NS} | 1,48 ^{NS} | 0,36 ^{NS} |
| Int, (Clone x DoseN) | 0,61 ^{NS} | 0,70 ^{NS} | 0,43 ^{NS} | 2,82 ^{NS} | 1,03 ^{NS} | 1,03 ^{NS} |
| Coefficiente de Variação | | | | | | |
| Resíduo A | 14,86 | 10,06 | 22,06 | 24,97 | 8,98 | 25,35 |
| Resíduo B | 41,01 | 9,64 | 26,53 | 30,71 | 14,31 | 17,22 |

Legenda: ¹ SW – Teste de Shapiro Wilk: ($p \leq 0,05$) dados não normais e ($p > 0,05$) dados normais, ² Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; ($p < 0,05$) e ^{**} ($p < 0,01$) significativo.

FONTE: A Autora (2026)

A resposta seletiva nos teores de ácidos cafeoilquínicos observada neste estudo sugere que o aporte de N, embora fundamental para a produtividade, pode exercer influência secundária sobre o metabolismo. Nesse sentido, Aguiar et al., (2024) argumentam que a regulação desses compostos é altamente responsiva à luminosidade, observando que o sombreamento pode se sobrepor ao efeito nutricional isolado.

Esse cenário corrobora a perspectiva de Tomasi (2020), ao indicar que a modulação dos fenólicos na erva-mate resulta de uma complexa interação multifatorial, onde a resposta à adubação nitrogenada é frequentemente mediada pelo contexto ambiental e pela variabilidade do material genético. Assim, esse comportamento variável nas doses testadas reforça a hipótese de que o manejo mineral deve ser planejado de forma integrada às condições de cultivo para não negligenciar as limitações impostas pelo ambiente e pelo genótipo.

Os valores dos ácidos cafeoilquínicos encontrados neste trabalho (TABELA 11), estão próximos aos encontrados por Gabira (2022), com avaliação na mesma localidade. De forma semelhante, Friedrich (2017) observou ampla variação nos teores de metilxantinas e ácidos cafeoilquínicos, com predominância do ácido 3-CQA em relação aos isômeros 5-CQA e 4-CQA, segundo o autor, a maior diversidade genética ocorre no interior das populações, permitindo a identificação de recursos genéticos com características desejáveis, como baixo teor de cafeína e maior teor de teobromina, os quais podem ser explorados em programas de melhoramento.

TABELA 11 - TEORES DOS ÁCIDOS CAFEOLQUÍNICOS DA ERVA-MATE, EXPRESSOS COMO 3-CQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO), 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO), 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO), 3,5-DCQ, 3,4-DCQ E 4,5-DCQ, AVALIADOS SEIS ANOS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO EM GENERAL CARNEIRO – PR, SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO E DENSIDADES DE PLANTIO.

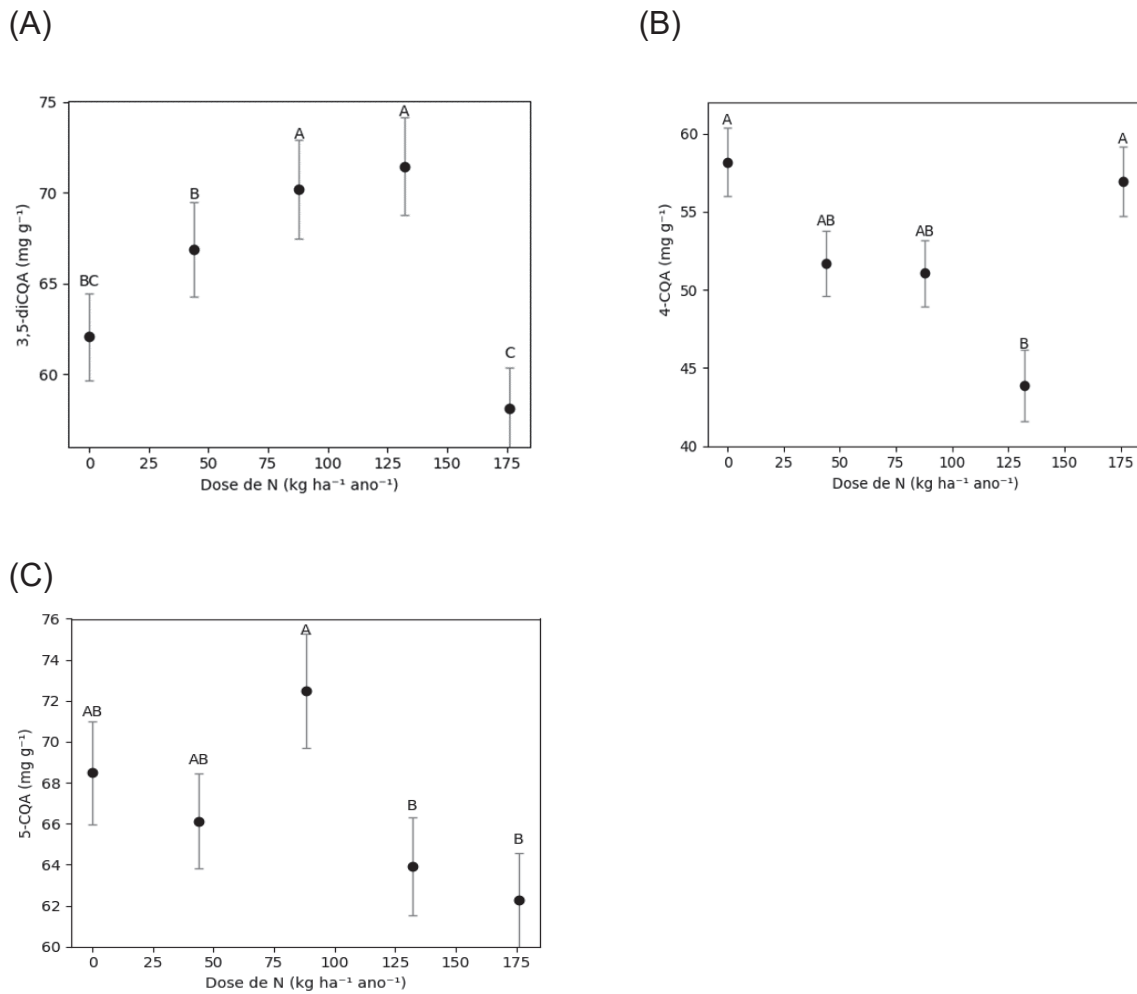
| Testes | 3-CQA (mg,g) | 5-CQA (mg,g) | 4-CQA (mg,g) | 3,5-diCQA (mg,g) | 3,4-diCQA (mg,g) | 4,5-diCQA (mg,g) |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Adubação Nitrogenada | | | | | | |
| 0 Kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 59,89 | 68,48 | 58,18 | 62,06 | 16,48 | 24,99 |
| 44 Kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 59,46 | 66,13 | 51,70 | 66,86 | 18,40 | 28,20 |
| 88 Kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 61,59 | 72,50 | 51,07 | 70,18 | 18,36 | 26,46 |
| 132 Kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 57,61 | 63,91 | 43,87 | 71,44 | 17,61 | 25,66 |
| 176 Kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | 55,71 | 62,26 | 56,94 | 58,09 | 18,96 | 25,92 |
| Clone | | | | | | |
| BLD Yari | 39,38 A | 68,64 A | 53,29 A | 77,20 A | 18,27 A | 25,60 A |
| BLD Aupaba | 36,53 A | 64,92 A | 48,10 B | 80,65 A | 17,65 A | 26,88 A |

FONTE: A Autora (2026)

Entretanto, ao submeter os dados à análise de regressão, não foi observado ajuste significativo ($y = ns$) a modelos polinomiais de primeira ou segunda ordem

para as doses de N avaliadas para os teores de 3,5-diCQA, 4-CQA e 5-CQA, Apesar disso, a análise de variância indicou efeito das doses sobre esses compostos, permitindo a aplicação do teste de comparação de médias, conforme apresentado na Figura 6.

FIGURA 6 - INFLUÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA SOBRE OS TEORES DE ÁCIDOS CAFEOILQUÍNICOS NA ERVA-MATE, (A) 3,5-DICQA (ÁCIDO NEOCLOROGÊNICO); (B) 4-CQA (ÁCIDO CRIPTOCLOROGÊNICO); (C) 5-CQA (ÁCIDO CLOROGÊNICO).



LEGENDA: Cada ponto representa a média dos tratamentos, e as barras indicam o erro padrão da média. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre doses de nitrogênio pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: A Autora (2026)

Entre os compostos avaliados, o 4-CQA foi o único que apresentou diferença significativa entre os clones, com maiores teores observados no clone Yari em

comparação ao Aupaba (Tabela 11). Esse resultado nos mostra que a síntese desse isômero é fortemente dependente do genótipo, sugerindo controle genético específico da rota biossintética associada ao 4-CQA (MAGAÑA, et al., 2021).

A adubação nitrogenada, por sua vez, modulou os teores dos ácidos cafeoilquínicos de forma não contínua, evidenciando respostas metabólicas pontuais. Doses intermediárias proporcionaram aumento do teor do 3,5-DICQA e redução do teor de 4-CQA. Por outro lado, o teor de 5-CQA diminuiu nas maiores doses de N utilizadas (FIGURA 6).

O interesse em estudo dos ácidos cafeoilquínicos vem crescendo, estudos já demonstram seu potencial na atividade na amenização do declínio cognitivo e doenças relacionadas ao estilo de vida, bem como ao seu uso emergente como antivirais com grande potencial para o desenvolvimento de medicamentos (MAGAÑA, et al., 2021).

Com base no estudo de Caruso et al., (2024), observa-se que tanto a erva-mate quanto o chá preto (*Camellia sinensis*) apresentam elevada capacidade antioxidante. A comparação entre as amostras revelou que esse desempenho varia conforme o tipo e a composição do material vegetal, sendo o chá preto o que apresentou maior eficiência de eliminação do radical, seguido pela erva-mate composta exclusivamente por folhas.

De modo geral, a erva-mate apresenta elevados teores de compostos fenólicos e alta atividade antioxidante, os quais variam em função das condições climáticas e ambientais, uma vez que esses fatores modulam o metabolismo vegetal e regulam a síntese de metabólitos secundários (LOBO et al., 2020; YANG et al., 2018; TOMASI, 2018; CROGE et al., 2020).

Estudos recentes demonstram ampla variação nos teores de ácidos cafeoilquínicos entre espécies vegetais, refletindo diferenças metabólicas inerentes à matriz vegetal, como em trabalho de Islam et al., (2024) que relataram teores relativamente modestos em espécies aromáticas e medicinais, com valores entre 2,78 e 5,49 mg g⁻¹ em folhas de hortelã-chocolate, 14,71 mg g⁻¹ em *Melissa officinalis* (erva-cidreira) e apenas 0,41 mg g⁻¹ em *Ocimum basilicum* (manjeriço), evidenciando forte efeito da espécie sobre a acumulação desses compostos.

De forma semelhante, Khaksar et al., (2021) observaram variação no teor total de ácidos cafeoilquínicos entre 3,99 e 22,01 mg g⁻¹ em hortaliças e leguminosas, com destaque para o girassol (*Helianthus annuus*), que apresentou

22,01 mg g⁻¹, predominantemente na forma de 3,5-dicafeoilquínico, e para o brócolis (*Brassica oleracea* var, *italica*), com 15,32 mg g⁻¹. Resultados comparáveis foram reportados por Caleja et al., (2017) em camomila (*Matricaria recutita* L.), com teor total de ácidos fenólicos de 23,66 mg g⁻¹ de matéria seca.

Em contraste, os resultados deste estudo indicam que a erva-mate apresenta teores substancialmente superiores de ácidos cafeoilquínicos, independentemente da dose de N aplicada. Embora o aumento das doses de N tenha promovido variações quantitativas nos compostos, os teores totais permaneceram elevados em todas as condições avaliadas, superando amplamente os valores reportados para espécies medicinais e hortaliças (CALEJA et al., 2017; ISLAM et al., 2024). Essas variações não foram suficientes para comprometer o alto potencial antioxidante da erva-mate.

A busca por materiais genéticos que conciliem alta produtividade com qualidade sensorial tem se intensificado nos últimos anos. Dessa forma, além dos aspectos relacionados ao rendimento da cultura, torna-se essencial considerar parâmetros de qualidade da erva-mate, especialmente os compostos químicos associados às suas propriedades funcionais, como cafeína, teobromina e antioxidantes, A seleção de genótipos que reúnam essas características pode contribuir de forma significativa para o desenvolvimento de produtos diferenciados e de maior valor agregado (FLOSS et al., 2022).

4 CONCLUSÃO

O aumento da densidade populacional foi determinante para elevar a produtividade da erva-mate, evidenciando o potencial dos sistemas adensados para a intensificação produtiva da cultura.

A adubação nitrogenada proporcionou resposta dependente do material genético e sistema de cultivo, Em sistemas com plantas seminais sob elevadas densidades, o aumento das doses de N não promoveu incremento na produtividade. Em contraste, nos sistemas conduzidos com material clonal, a adubação com 138 kg ha⁻¹ N, aproximadamente 150% da dose atual recomendada, elevou a produtividade a maiores patamares, destacando a importância do manejo nutricional ajustado ao material genético e cultural.

De modo geral, os compostos bioativos cafeína e teobromina mantiveram-se estáveis frente às variações de densidade de plantio, doses de N e variedade clonal. As concentrações de ácidos cafeoilquínicos permaneceram dentro das faixas esperadas para a espécie, houve variações pela adubação nitrogenada, porém não foram suficientes para comprometer a qualidade da erva-mate, contribuindo, em determinadas condições, para a melhoria de sua qualidade fitoquímica.

5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar os efeitos de longo prazo do adensamento sobre a longevidade das plantas e a sustentabilidade do sistema produtivo;
- Investigar a interação entre adubação nitrogenada e disponibilidade luminosa na modulação de compostos fenólicos;
- Avaliar respostas fisiológicas e metabólicas em diferentes épocas de colheita.

6 REFERÊNCIAS

AGUIAR, N. S.; GABIRA, M. M.; TOMASI, J. C.; DUARTE, M. M.; VIEIRA, L. M.; LAVORANTI, O. J.; WENDLING, I. Productivity of clonal *Ilex paraguariensis* genotypes in a semi-hydroponic system is reduced by shading. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 24, p. 5961-5971, 2024.

AGUIAR, N. S. de; DESCHAMPS, C.; GABIRA, M. M.; HELM, C. V.; SANTIN, D.; WENDLING, I. Planting seasons and environments in initial field establishment of yerba mate clonal cultivars in Southern Brazil. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 70, e70606, out./nov. 2023. DOI: 10.1590/0034-737X202370060006.

AGUIAR, N. S. de; TOMASI, J. de C.; VIEIRA, L. M.; DUARTE, M. M.; GABIRA, M. M.; WENDLING, I. Cevad estufa: cultivo de erva-mate em alta densidade em estufa. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2023. (Comunicado Técnico, n. 485b).

AGUIAR, N. S. de; DUARTE, M. M.; GABIRA, M. M.; BENEDITO, D. C. D.; WENDLING, I. Produtividade de cultivares clonais de erva-mate em diferentes épocas de plantio. In: SEMINÁRIO ERVA-MATE XXI: Avanços Científicos, Tecnológicos e de Mercado, 3., 2024, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: Embrapa Florestas, 2024. p. 53.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AQUINO, R. E.; FALCÃO, H. M.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. Variação nas concentrações de compostos fenólicos e nas taxas de herbivoria em *Aspidosperma pyrifolium* Mart. em áreas antropizadas de Caatinga. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 1, p. 61-71, 2017. DOI: 10.24221/jeap.2.1.2017.1075.61-71.

ASHIHARA, H.; SANO, H.; CROZIER, A. Caffeine and related purine alkaloids: biosynthesis, catabolism, function and genetic engineering. *Phytochemistry*, v. 69, p. 841-856, 2008. DOI: 10.1016/j.phytochem.2007.10.029.

BENEDITO, D. C. D.; STUEPP, C. A.; HELM, C. V.; LIZ, M. V. D.; MIRANDA, A. C. D.; IMOSKI, R.; LAVORANTI, O. J.; WENDLING, I. Bioactive compounds concentrations and stability in leaves of *Ilex paraguariensis* genotypes. *Forests*, v. 14, 2411, 2023. DOI: 10.3390/f14122411.

BERGAMIM, M. Novo sistema de cultivo de erva-mate pode aumentar a produtividade em até 160% nos primeiros anos. *Embrapa*, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80039244/novo-sistema-de-cultivo-de-erva-mate-pode-aumentar-a-produtividade-em-ate-160-nos-primeiros-anos>. Acesso em: 21 jun. 2024.

BRACESCO, N.; SÁNCHEZ, A. G.; PICOLLO, M. I. Atividade antioxidante de extratos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Journal of Food Science*, v. 76, n. 2, p. S248-S253, 2011.

BLUM-SILVA, C. H.; CHAVES, V. C.; SCHENKEL, E. P.; COELHO, G. C.; REGINATTO, F. H. The influence of leaf age on methylxanthines, total phenolic content, and free radical scavenging capacity of *Ilex paraguariensis* aqueous extracts. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 25, p. 1-6, 2015. DOI: 10.1016/j.bjp.2015.01.002.

CALEJA, C.; BARROS, L.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; SANTOS-BUELGA, C.; FERREIRA, I. C. F. R. Caracterização do perfil fenólico de extratos aquosos de *Matricaria recutita* L. obtidos por decocção. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 40, n. 4, p. 673-684, 2017. DOI: 10.19084/RCA16212.

CAMARGO, M. C. R. de; TOLEDO, M. C. F. H. HPLC determination of caffeine in tea, chocolate products and carbonated beverages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 79, n. 13, p. 1861-1864, 1999. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(199910)79:13<1861::AID-JSFA448>3.0.CO;2-Y.

ASHIHARA, H.; SANO, H.; CROZIER, A. Caffeine and related purine alkaloids: biosynthesis, catabolism, function and genetic engineering. *Phytochemistry*, v. 69, p. 841-856, 2008. DOI: 10.1016/j.phytochem.2007.10.029.

BENEDITO, D. C. D.; STUEPP, C. A.; HELM, C. V.; LIZ, M. V. D.; MIRANDA, A. C. D.; IMOSKI, R.; LAVORANTI, O. J.; WENDLING, I. Bioactive compounds concentrations and stability in leaves of *Ilex paraguariensis* genotypes. *Forests*, v. 14, 2411, 2023. DOI: 10.3390/f14122411.

BERGAMIM, M. Novo sistema de cultivo de erva-mate pode aumentar a produtividade em até 160% nos primeiros anos. *Embrapa*, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80039244/novo-sistema-de-cultivo-de-erva-mate-pode-aumentar-a-produtividade-em-ate-160-nos-primeiros-anos>. Acesso em: 21 jun. 2024.

BLUM-SILVA, C. H.; CHAVES, V. C.; SCHENKEL, E. P.; COELHO, G. C.; REGINATTO, F. H. The influence of leaf age on methylxanthines, total phenolic content, and free radical scavenging capacity of *Ilex paraguariensis* aqueous extracts. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 25, p. 1-6, 2015. DOI: 10.1016/j.bjp.2015.01.002.

BRACESCO, N.; SÁNCHEZ, A. G.; PICOLLO, M. I. Atividade antioxidante de extratos de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). *Journal of Food Science*, v. 76, n. 2, p. S248-S253, 2011.

CALEJA, C.; BARROS, L.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; SANTOS-BUELGA, C.; FERREIRA, I. C. F. R. Caracterização do perfil fenólico de extratos aquosos de *Matricaria recutita* L. obtidos por decocção. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 40, n. 4, p. 673-684, 2017. DOI: 10.19084/RCA16212.

CAMARGO, M. C. R. de; TOLEDO, M. C. F. H. HPLC determination of caffeine in tea, chocolate products and carbonated beverages. *Journal of the Science of Food*

and Agriculture, v. 79, n. 13, p. 1861-1864, 1999. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0010(199910)79:13.1861::AID-JSFA448>3.0.CO;2-Y.

CARUSO, F.; SAKIB, R.; BELLI, S.; CARUSO, A.; ROSSI, M. Antioxidant scavenging of the superoxide radical by yerba mate (*Ilex paraguariensis*) and black tea (*Camellia sinensis*) plus caffeic and chlorogenic acids, as shown via DFT and hydrodynamic voltammetry. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 17, 9342, 2024. DOI: 10.3390/ijms25179342.

CARVALHO, P. E. R. *Espécies arbóreas brasileiras*. Brasília, DF: Embrapa, 2003. v. 1. DOI: 10.1525/9780520328495.

CHARDON, F.; NOËL, V.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. Exploring NUE in crops and in *Arabidopsis* ideotypes to improve yield and seed quality. *Journal of Experimental Botany*, v. 63, n. 9, p. 3401-3412, 2012.

CHIRIAC, O. P.; PITTARELLO, M.; MORETTI, B.; ZAVATTARO, L. Factors influencing nitrogen derived from soil organic matter mineralisation: results from a long-term experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 381, art. 109444, 2025. DOI: 10.1016/j.agee.2024.109444.

CROGE, C. P.; CUQUEL, F. L.; PINTRO, P. T. M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition: a review. *Food Science and Technology*, v. 40, e20190259, 2020.

DUARTE, M. M.; GABIRA, M. M.; TOMASI, J. de C.; AMANO, E.; NOGUEIRA, A. C.; WENDLING, I. Bioactive compounds and leaf anatomy of yerba mate morphotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, e02441, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02441.

EMBRAPA. *Descritores mínimos em cultivares de espécies florestais: uma contribuição para erva-mate*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2019. ISSN 1980-3958. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1117327/1/Doc3331025final.pdf>. Acesso em: 27 dez. 2025.

EMBRAPA. Novo sistema de cultivo de erva-mate pode aumentar a produtividade em até 160% nos primeiros anos. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80039244/novo-sistema-de-cultivo-de-erva-mate-pode-aumentar-a-produtividade-em-ate-160-nos-primeiros-anos>. Acesso em: 21 jun. 2024.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. *Nutrição mineral de plantas*. 2. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.

FILIP, R.; LÓPEZ, P.; GIBERTI, G.; COUTINHO, A. Yerba mate (*Ilex paraguariensis*) beyond caffeine: a review of its phytochemistry and pharmacology. *Journal of Ethnopharmacology*, v. 169, p. 85-104, 2015.

FLOSS, P. A.; STUEPP, C. A.; WENDLING, I.; CIPRIANI, V. B.; REIS, F.; FIORAVANTE, C. A. Melhoramento genético de *Ilex paraguariensis* para o oeste do Estado de Santa Catarina: estimativa de parâmetros fenotípicos e genéticos. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 3, e1711326084, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.26084.

FRIEDRICH, J. C.; GONELA, A.; GONÇALVES VIDIGAL, M. C.; VIDIGAL FILHO, P. S.; STURION, J. A.; CARDOZO JUNIOR, E. L. Genetic and phytochemical analysis to evaluate the diversity and relationships of mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) elite genetic resources in a germplasm collection. *Chemistry & Biodiversity*, v. 14, n. 3, e1600177, 2017.

GABIRA, M. M.; BERGERON, Y.; DUARTE, M. M.; AGUIAR, N. S. de; KRATZ, D.; SILVA, M. R. da; GIRONA, M. M. Morphological, physiological, and biochemical responses of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) genotypes to water deficit. *New Forests*, v. 55, n. 6, p. 1771-1785, 2024.

GABIRA, M. M.; AGUIAR, N. S.; DUARTE, M. M.; VIEIRA, L. M.; TOMASI, J. C.; MAGGIONI, R. A.; WENDLING, I. *CEVAD campo: cultivo de erva-mate em alta densidade no campo*. Colombo, PR: Embrapa, 2023. (Comunicado Técnico, 486).

GABIRA, M. M. *Ilex paraguariensis silviculture: nutrition and planting density in a new cultivation system*. 2022. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

GOMEZ, K. A.; GOMEZ, A. A. *Statistical procedures for agricultural research*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

GOMES, F. P.; MALAVOLTA, E. Aspectos matemáticos e estatísticos da Lei de Mitscherlich. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, Piracicaba, v. 6, p. 193-229, 1949.

GOULART, I. C. G. dos R.; SANTIN, D.; BRASILEIRO, B. P. Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1345-1367, jul./set. 2022.

HAMMERSCHMIDT, J. M.; CIPRIANO, R. R.; HELM, C. V.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; DESCHAMPS, C. Composição físico-química, metilxantinas e conteúdo de compostos fenólicos dos subprodutos da agroindústria da erva-mate. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 45, n. 4, p. 1147-1162, jul./ago. 2024. DOI: 10.5433/1679-0359.2024v45n4p1147.

HECK, C. I.; DE MEJÍA, E. G. Yerba mate (*Ilex paraguariensis*) as a functional beverage: extraction, composition and biological effects. *Journal of Food Science*, v. 72, n. 2, p. R113-R123, 2007.

HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. The dilemma of plants: to grow or defend. *The Quarterly Review of Biology*, Chicago, v. 67, n. 3, p. 283-335, 1992. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2830650>.

HUBER, M.; NIEUWENDIJK, N. M.; PANTAZOPOULOU, C. K.; PIERIK, R. Light signalling shapes plant–plant interactions in dense canopies. *Plant, Cell & Environment*, 2020. DOI: 10.1111/pce.13912.

ISLAM, S.; ADAM, Z.; AKANDA, J. H. Quinic and caffeic acids derivatives: affecting antioxidant capacities and phenolics contents of certain therapeutic and specialty crops employing water and ethanolic extracts. *Food Chemistry Advances*, v. 4, p. 100693, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção agropecuária – erva-mate: cultivo 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/erva-mate-cultivo/br>. Acesso em: 20 out. 2025.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. *The dilution effect in plant nutrition studies*. In: BRADY, N. C. (Ed.). *Advances in Agronomy*, v. 34, p. 197–224, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60887-1)

JUNKEIRA, A. A.; BASSO, V. M.; SOUZA, N. D. Evolução da extração vegetal de erva-mate no período de 2004 a 2015. In: SEMANA DE APERFEIÇOAMENTO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2017, Curitiba. Anais [...]. Curitiba, 2017. p. 306-310.

KHAN, N.; AFAQ, F.; MUKHTAR, H. Cancer chemoprevention by dietary antioxidants: an update. *Nutrition and Cancer*, v. 70, n. 2, p. 161-175, 2018.

KHAKSAR, G.; CHEEVARUNGNAPAKUL, K.; BOONJING, P.; SIRIKANTARAMAS, S. Sprout caffeoylquinic acid profiles as affected by variety, cooking, and storage. *Frontiers in Nutrition*, v. 8, 2021. DOI: 10.3389/fnut.2021.748001.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.-H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, v. 28, n. 4, p. 614-624, 2008. DOI: 10.1016/j.eja.2008.01.005.

LISBOA, B. B.; ABICHEQUER, A. D.; SÃO JOSÉ, J. F. B. de; MOURA-BUENO, J. M.; BRUNETTO, G.; VARGAS, L. K. Compositional nutrient diagnosis methodology and its effectiveness to identify nutrient levels in yerba mate (*Ilex paraguariensis*). *Agriculture*, v. 14, 896, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14060896.

LOBO, R.; VICENZI, R.; ROJAS-MORENO, D. A.; LOBO, A. A. G.; SILVA, C. M.; BENETEL, V.; GHUSSN, L. R.; MUFALO, V. C.; BERNDT, A.; GALLO, S. R.; PINHEIRO, R. S. B.; BUENO, I. C. S.; FACIOLA, A. P. Inclusion of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) extract in growing lamb diets: effects on blood parameters, animal performance and carcass characteristics. *Animals*, v. 10, 961, 2020. DOI: 10.3390/ani10060961.

LOURENÇO, R. S.; CURCIO, G. R.; RACHWAL, M. G.; MEDRADO, M. J. S. Avaliação de níveis de nitrogênio sobre a produção de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) em Fernandes Pinheiro, PR, em latossolo vermelho escuro. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 34, p. 75-98, jan./jun. 1997. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/282169>.

MAGAÑA, A.; KAMIMURA, N.; SOUMYANATH, A.; STEVENS, J. F.; MAIER, C. S. Caffeoylquinic acids: chemistry, biosynthesis, occurrence, analytical challenges, and bioactivity. *The Plant Journal*, v. 107, n. 5, p. 1299-1319, 2021. DOI: 10.1111/tpj.15390.

MARSCHNER, P. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-384905-2.

MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; DANIEL-VEDELE, F.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHON, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*, v. 105, n. 7, p. 1141-1157, 2010. DOI: 10.1093/aob/mcq028.

MELO, T. O.; MARQUES, F. A.; WENDLING, I.; KOPKA, J.; ERBAN, A.; HANSEL, F. A. *Compostos presentes em extrato metanólico de tecido foliar de erva-mate por meio da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas*. Colombo, PR:

Embrapa Florestas, 2020. (Comunicado Técnico, n. 458). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1125791/compostos-presentes-em-extrato-metanolico-de-tecido-foliar-de-erva-mate-por-meio-da-cromatografia-gasosa-acoplada-a-espectrometria-de-massas>. Acesso em: 15 dez. 2025.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

NAKAMURA, K. L.; CARDOZO JUNIOR, E. L.; DONADUZZI, C. M.; SCHUSTER, I. Genetic variation of phytochemical compounds in progenies of *Ilex paraguariensis* St. Hil. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 9, n. 2, 2009.

NUNES-NESE, A.; FERNIE, A. R.; STITT, M. Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions. *Molecular Plant*, v. 3, n. 6, p. 973-996, 2010.

OLIVA, E. V.; REISSMANN, C. B.; GAIAD, S.; OLIVEIRA, E. B.; STURION, J. A. Composição nutricional de procedências e progênies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em Latossolo Vermelho Distrófico. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 793-805, out./dez. 2014. ISSN 0103-9954.

PAULETTI, V.; MONTE SERRAT, B. *Nutrição de plantas aplicada*. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2025. ISBN 978-65-01-19854-5.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. (org.). *Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná*. 1. ed. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017.

REGINATTO, F. H.; ATHAYDE, M. L.; GOSMANN, G.; SCHENKEL, E. P. Methylxanthines accumulation in *Ilex* species: caffeine and theobromine in erva-mate (*Ilex paraguariensis*) and other *Ilex* species. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 10, n. 6, p. 443-446, 1999.

REISSMANN, C. B.; ROCHA, H. O.; KOEHLER, C. W.; CALDAS, R. L. S.; HILDEBRAND, E. E. Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.) sobre Cambissolos na região de Mandirituba. *Floresta*, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 49-54, 1983. DOI: 10.5380/rf.v14i2.6340.

RESENDE, M. D. V.; STURION, J. A.; CARVALHO, A. P. de; SIMEÃO, R. M.; FERNANDES, J. S. C. Programa de melhoramento da erva-mate coordenado pela EMBRAPA: resultados da avaliação genética de populações, progênies, indivíduos e clones. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2000. (Circular Técnica).

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BASTOS, M. C.; KASEKER, J. F.; REISSMANN, C. B.; BRONDANI, G. E.; BARROS, N. F. Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 363–375, abr./jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050989282>

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F. de; ALMEIDA, I. C.; LEAL, G. P.; FONTES, L.; NEVES, J. C. L.; WENDLING, I.; REISSMANN, C. B. Effect of potassium fertilization on yield and nutrition of yerba mate (*Ilex paraguariensis*). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1469-1477, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000500012.

SANTIN, D.; WENDLING, I.; BENEDETTI, E. L.; MORANDI, D.; DOMINGOS, D. M. Sobrevivência, crescimento e produtividade de plantas de erva-mate produzidas por miniestacas juvenis e por sementes. *Ciência Florestal*, v. 25, n. 3, p. 571-579, 2015.

SANTIN, D.; BENEDETTI, E. L.; BARROS, N. F. de; ALMEIDA, I. C.; SIMIQUELI, G. F.; NEVES, J. C. L.; REISSMANN, C. B. Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. *Ciência Florestal*, v. 29, p. 1199-1214, 2019.

SANTOS, H. G. dos et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4.

SILVA, F. C. da (org.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2010.

TEGEDER, M.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C. Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use. *New Phytologist*, v. 217, n. 1, p. 35-53, 2017. DOI: 10.1111/nph.14876.

TOMASI, J. de C. *Bioactive compounds of yerba mate according to genotype, nitrogen fertigation and drying methods and acceptance of mate tea by consumers*. 2020. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Produção Vegetal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

TORRES, A.; NORIEGA, L. G.; DELGADILLO-PUGA, C.; TOVAR, A. R.; NAVARRO-OCAÑA, A. Caffeoylquinic acid derivatives of purple sweet potato as modulators of mitochondrial function in mouse primary hepatocytes. *Molecules*, v. 26, 319, 2021. DOI: 10.3390/molecules26020319.

VIDAL, E. A.; GUTIÉRREZ, R. A. A systems view of nitrogen nutrient and metabolite responses in *Arabidopsis*. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 11, n. 5, p. 521-529, 2008.

WATSON, R. R. *Plant phenolics and human health: biochemistry, nutrition, and pharmacology*. 1. ed. San Diego: Academic Press, 2010.

WENDLING, I.; SANTIN, D. *Propagação e nutrição de erva-mate*. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 195 p.

WENDLING, I.; SANTIN, D.; NAGAOKA, R.; STURION, J. A. *BRS BLD Aupaba e BRS BLD Yari: cultivares clonais de erva-mate para produção de massa foliar de sabor suave*. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2017. 6 p.

YANG, L.; WEN, K.-S.; RUAN, X.; ZHAO, Y.-X.; WEI, F.; WANG, Q. Response of plant secondary metabolites to environmental factors. *Molecules*, v. 23, n. 4, p. 1-26, 2018.

YANG, W.; ZHU, Z.; LI, H.; ZHANG, R.; CHEN, G.; XU, J.; LI, C. Variations of growth, nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency among 18 willow clones under two nitrogen regimes. *Agroforestry Systems*, v. 89, n. 1, p. 67-79, 2015.