

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE

**INOCULAÇÃO MICORRÍZICA E DOSES DE FÓSFORO NO CRESCIMENTO
INICIAL DA ERVA-MATE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

THAIS SZCZEPANIK

**IRATI - PR
2023**

THAIS SZCZEPANIK

**INOCULAÇÃO MICORRÍZICA E DOSES DE FÓSFORO NO CRESCIMENTO
INICIAL DA ERVA-MATE**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fabricio William de Ávila - UNICENTRO
Orientador

Prof. Dra. Katia Cylene Lombardi - UNICENTRO
Coorientadora

Prof. Dr. Orivaldo José Saggin Júnior – EMBRAPA AGROBIOLOGIA
Coorientador

IRATI - PR
2023

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da UNICENTRO

S996i Szczepanik, Thais
Inoculação micorrízica e doses de fósforo no crescimento inicial da erva-
mate / Thais Szczepanik. -- Irati, 2023.
x, 59 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em
Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, 2023.

Orientador: Fabricio William de Ávila
Coorientadora: Katia Cyrene Lombardi
Coorientador: Orivaldo José Saggin Júnior
Banca examinadora: Fabrício William de Ávila, Juliano Tadeu Vilela de
Resende, Orivaldo José Saggin Júnior, Fabiana Schmidt Bandeira Peres

Bibliografia

1. *Ilex paraguariensis*. 2. Nutrição florestal. 3. Microrganismos do solo.
4. Bioinsumos. 5. Sustentabilidade. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação
em Ciências Florestais.

| CDD 634.9



TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 173

Thais Szczepanik

"INOCULAÇÃO MICORRÍZICA E DOSES DE FÓSFORO NO CRESCIMENTO INICIAL DA ERVA-MATE".

Dissertação aprovada em 28/11/2023, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Juliano Tadeu Vilela de Resende
Universidade Estadual de Londrina
Primeiro Examinador

Dr. Orivaldo José Saggin Júnior
Embrapa Agrobiologia
Segundo Examinador

Prof^a. Dra. Fabiana Schmidt Bandeira Peres
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Terceira Examinadora

Prof. Dr. Fabrício William de Ávila
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora
Irati – PR

2023

Home Page: <http://www.unicentro.br>

Campus Santa Cruz: Rua Salvatore Renna – Padre Salvador, 875, Bairro Santa Cruz – Cx. Postal 3010 – Fone: (42) 3621-1000 – FAX: (42) 3621-1090
CEP 85.015-430 – GUARAPUAVA – PR

Campus Cedeteg: Alameda Élio Antonio Dalla Vecchia, 838, Bairro Vila Carli – Fone: (42) 3629-8100 – CEP 85.040-167 – GUARAPUAVA – PR

Campus de Irati: Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez – Cx. Postal, 21 – Fone: (42) 3421-3000
CEP 84.505-677 – IRATI – PR



ePROTOCOLO

Correspondência Interna 069/2023.

Documento: **AtaeTermodeAprovacaoThais.pdf**.

Assinatura Avançada realizada por: **Thaís Szczepanik (XXX.227.169-XX)** em 12/12/2023 12:15 Local: CIDADAO, **Fabrcio William de Ávila (XXX.113.538-XX)** em 12/12/2023 15:18 Local: CIDADAO, **Juliano Tadeu Vilela de Resende (XXX.293.556-XX)** em 12/12/2023 15:29 Local: UEL/CCA/AGRO.

Assinatura Simples realizada por: **Fabiana Schmidt Bandeira Peres (XXX.955.721-XX)** em 11/12/2023 19:56, **Orivaldo José Saggin Júnior (XXX.984.158-XX)** em 23/01/2024 16:36 Local: CIDADAO.

Inserido ao documento **708.795** por: **Silvana Aparecida Kowalski** em: 11/12/2023 17:07.



Documento assinado nos termos do Art. 38 do Decreto Estadual nº 7304/2021.

A autenticidade deste documento pode ser validada no endereço:
<https://www.eprotocolo.pr.gov.br/spiweb/validarDocumento> com o código:
7c9bf2482614752a49ace923207dfbfc.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me sustentado em todos os dias de minha vida até aqui.

A minha família pelo apoio incondicional e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabricio William de Ávila, pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo suporte, orientação e incentivo.

À coorientadora desta pesquisa Prof^a. Dra. Katia Cyrene Lombardi e por sua contribuição e apoio no desenvolvimento deste estudo.

Ao coorientador Prof. Dr. Orivaldo José Saggin Júnior e a Embrapa Agrobiologia, pelo apoio nesta pesquisa na forma de conhecimentos e de materiais para desenvolvimento de pesquisa.

Ao CEFEP Presidente Costa Silva, pela confiança e disponibilidade de sua estrutura.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste e aos professores pelo conhecimento adquirido.

Aos alunos do CEFEP Presidente Costa Silva e da Universidade Estadual do Centro-Oeste que auxiliaram de alguma forma para a conclusão deste estudo.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. Erva-mate	5
3.1.1. Distribuição geográfica e fitoecologia	5
3.1.2. Características gerais.....	7
3.1.3. Características históricas e econômicas.....	10
3.2. Influência nutricional na erva-mate	13
3.2.1. Manejo nutricional geral	13
3.2.2. Interação entre o fósforo, o ambiente e a planta	14
3.2.3. Efeitos do fósforo na nutrição vegetal	19
3.3. Fungos micorrízicos arbusculares	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1. Local de estudo	24
4.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	25
4.3. Instalação e condução do experimento	26
4.4. Avaliações realizadas	28
4.5. Análise de dados	29
5. RESULTADOS.....	30
5.1. Crescimento inicial.....	30
5.2. Produção de matéria seca	34
5.3. Concentração de fósforo na matéria seca	36
5.4. Quantidade de fósforo acumulada na matéria seca.....	39
6. DISCUSSÃO	42
7. CONCLUSÕES	49
8. REFERÊNCIAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Imagem georreferenciada da localização do viveiro de produção de mudas de espécies florestais do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CEFEP), situado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 24
- Figura 2.** Imagens feitas do experimento em diferentes fases: instalação, condução, avaliação de crescimento e colheita das plantas de erva-mate. (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 28
- Figura 3.** Altura de parte aérea (em centímetros) em plantas de erva-mate avaliadas aos 90 (A), 210 (B) e 320 (C e D) dias após o transplântio (DAT), em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 31
- Figura 4.** Diâmetro de coleto (em milímetros) em plantas de erva-mate avaliadas aos 90 (A), 210 (B e C) e 320 (D e E) dias após o transplântio (DAT), em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 32
- Figura 5.** Produção de matéria seca (em gramas) de folhas (A e B), caule (C e D), parte aérea (E e F), raízes (G e H), total (I e J) e relação percentual entre a matéria seca de raiz e parte aérea (K e L), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplântio, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 35
- Figura 6.** Teor de P (em $g\ kg^{-1}$) dos tecidos de matéria seca de folhas (A e B), caule (C e D) e raízes (E e F), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplântio, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 38
- Figura 7.** Acúmulo de P (em $mg\ planta^{-1}$) nas folhas (A e B), caule (C e D), parte aérea (E e F), raízes (G e H), total (I e J) e relação percentual de acúmulo de P entre raiz e parte aérea (K e L), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplântio, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 40

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) presentes na composição do inoculante que foi usado para inocular as plantas no momento do plantio (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 26
- Tabela 2.** Resultados da análise granulométrica e química do solo utilizado como substrato para o cultivo das plantas de erva-mate (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 27
- Tabela 3.** Quadrados médios da análise de variância para altura de parte aérea e diâmetro de coleto em plantas de erva-mate avaliadas aos 90, 210 e 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 30
- Tabela 4.** Quadrados médios da análise de variância para pesos de matéria seca de folha (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). .. 34
- Tabela 5.** Quadrados médios da análise de variância para teor de fósforo na matéria seca de folha (P-folha), caule (P-caule) e raiz (P-raiz) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 37
- Tabela 6.** Quadrados médios da análise de variância para acúmulo de P na matéria seca de folha (AP-folha), caule (AP-caule), parte aérea (AP-PA), raiz (AP-raiz) e total (AP-total) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023). 39

RESUMO

A erva-mate é o principal produto florestal não madeireiro da região Sul do Brasil. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) podem melhorar a eficiência da absorção de fósforo (P) pelas plantas, mas ainda pouco se sabe a respeito da erva-mate. Objetivou-se avaliar os efeitos de FMAs e doses de P no crescimento inicial, produção de matéria seca e nutrição fosfatada em erva-mate. O experimento foi conduzido no viveiro de produção de mudas do Colégio Florestal de Irati-PR. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições, em esquema fatorial 2x7, sendo dois tratamentos de inoculação micorrízica e sete tratamentos de doses de P adicionadas ao solo. Aos 90, 210 e 320 dias após o transplântio (DAT), realizou-se as avaliações de crescimento, compostas por medições de altura de parte aérea e diâmetro de coleto. As plantas foram colhidas e obteve-se os pesos de matéria seca de raízes, caule e folhas. Posteriormente, a quantidade de P acumulada nessas partes da planta foi estimada após a determinação do teor de P na matéria seca. A adubação fosfatada em doses moderadas incrementou o crescimento e a produção de matéria seca da erva-mate. A quantidade de P acumulada nas raízes e parte aérea da erva-mate aumentou conforme o incremento das doses de P no solo. A inoculação de FMAs proporcionou maior crescimento inicial da erva-mate em solo deficiente em P, e incrementou a produção de biomassa de raízes e parte aérea e a quantidade de P acumulada na parte aérea da erva-mate. Mostra-se, assim, a viabilidade de se utilizar inoculantes a base de FMAs visando melhorar o desenvolvimento e a absorção de P pela erva-mate em solos pobres.

Palavras-chave: *Ilex paraguariensis*, nutrição florestal, microrganismos do solo, bioinsumos, sustentabilidade

ABSTRACT

Yerba mate is the main non-timber forest product in the southern region of Brazil. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can improve phosphorus (P) uptake efficiency in plants, but little is known about its effects on yerba mate. The objective was to evaluate the effects of AMF and P doses on the initial growth, dry matter production, and phosphorus nutrition in yerba mate. The experiment was conducted in the seedling production nursery of the Forest School in Irati-PR, Brazil. The experimental design was randomized blocks with four replicates in a 2x7 factorial scheme, with two mycorrhizal inoculation treatments and seven P-dose treatments added to the soil. At 90, 210, and 320 days after transplanting (DAT), growth evaluations were performed, including measurements of shoot height and stem diameter. Plants were harvested, and dry weights of roots, stem, and leaves were obtained. Subsequently, the amount of accumulated P in these plant parts was estimated after determining the P content in the dry matter. Phosphorus fertilization in moderate doses increased the growth and dry matter production of yerba mate. The amount of accumulated P in yerba mate shoot and roots increased with the increment of P doses in the soil. Arbuscular mycorrhizal fungi promoted greater initial growth of yerba mate in P-deficient soil and increased biomass production of roots and shoot, as well as the amount of accumulated P in the shoot. This demonstrates the feasibility of using AMF-based inoculants to improve the development and P uptake by yerba mate in nutrient-poor soils.

Keywords: *Ilex paraguariensis*, plant nutrition, soil microorganisms, bioinputs, sustainability

1. INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil) é uma árvore perene originária das regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, no Brasil encontrada com maior abundância na região Sul, geralmente acompanhada das árvores de araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze) (CARVALHO, 2003; CUBAS, 2015; GERHARDT, 2013).

Antes mesmo de serem popularizadas, as folhas de erva-mate já eram beneficiadas e consumidas pelas populações originárias das bacias dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai. Ao longo das gerações, o consumo deste produto se difundiu por uma ampla extensão territorial sul-americana, tornando-se imprescindível fonte de emprego e renda para inúmeros produtores rurais de pequeno e médio porte, sendo muitas vezes a principal fonte de renda das propriedades e figurando no brasão de alguns municípios brasileiros devido ao seu destaque econômico (CHECHI e SCHULTZ; 2019).

Atualmente, a produção de erva-mate é considerada como um dos sistemas florestais e agroflorestais de maior equilíbrio ecológico do país, produzindo riqueza aos produtores de menor porte e revalorizando a cultura dos povos tradicionais. Assim, o cultivo da erva-mate passou a ser a principal atividade florestal não madeireira da região Sul do Brasil (JÚNIOR; FOCKINK, 2017). O aumento do cultivo da erva-mate no Sul do país muito se deve aos modernos usos da planta como medicamento fitoterápico, cosmético e alimento rico em propriedades benéficas à saúde (CROGE; CUQUEL; PINTRO, 2021).

Devido ao aumento da intensidade das podas dos ervais para atender ao consumo do produto pela sociedade, o manejo nutricional da planta tem recebido maior atenção, a fim de evitar decréscimos de produtividade e a perda de vigor das plantas nas áreas cultivadas. A produtividade e a qualidade dos plantios de erva-mate costuma estar fortemente correlacionada ao aumento da frequência do uso de práticas de manejo de solos, especialmente o manejo da sua fertilidade (GOULART; SANTIN; BRASILEIRO, 2022).

Entre os nutrientes de plantas, os solos brasileiros apresentam baixos teores de fósforo (P) em solução, pois grande parte desse nutriente encontra-se fortemente sorvido aos coloides do solo, tornando-o limitante para as culturas, sendo que estudos demonstraram maior crescimento das plantas de erva-

mate quando cultivados em solos com teores adequados de fósforo (SANTIN, 2013).

Conforme Rheinheimer *et al.* (2020), além de onerosos ao produtor, a produção e uso de adubos minerais fosfatados traz uma série de impactos negativos ao ambiente. Ademais, a eficiência da adubação fosfatada é baixa, resultando em altas doses de adubo aplicadas no manejo nutricional das plantas. O P apresenta complexas interações com os colóides minerais do solo, envolvendo os fenômenos de sorção dos ânions fosfatos (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), especialmente em solos intemperizados. Ainda, a sua taxa de difusão no solo é extremamente baixa, o que leva a formação de um volume de depleção do nutriente em volta da raiz, limitando a sua absorção pela planta (RHEINHEIMER *et al.*, 2020).

A fim de aumentar a eficiência da nutrição fosfatada nos ervais, buscam-se métodos alternativos para aumentar a superfície absorptiva das raízes. Neste sentido, a inoculação da erva-mate com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) durante o plantio pode promover efeitos positivos na nutrição dos ervais.

Os FMAs colonizam o córtex radicular das plantas sem danificar os tecidos vegetais, desenvolvendo hifas com grande superfície de contato com o solo, absorvendo água e nutrientes que são disponibilizados às plantas colonizadas (COLOZZI-FILHO e NOGUEIRA, 2007). A colonização das raízes por FMAs resulta em modificações na fisiologia, bioquímica e nutrição mineral da planta hospedeira, ampliando sua capacidade de absorção de água e nutrientes (CARNEIRO *et al.*, 2011).

Percebe-se que o estado nutricional de P da planta hospedeira tem influência direta na taxa de colonização dos FMAs, uma vez que a colonização parece acontecer prioritariamente em solos deficientes em P. Desta forma, as associações entre árvores e os FMAs têm sido consideradas uma alternativa para aumentar a disponibilidade de P para a nutrição das plantas, promovendo maior absorção deste nutriente, podendo ser considerada como um mecanismo adaptativo que permite maximizar a aquisição de P de uma forma que dispense menos energia que a própria produção de raízes (CLARK *et al.*, 2000).

Frente ao exposto, torna-se pertinente a busca por alternativas de manejo silvicultural que promovam a redução da adubação mineral fosfatada por meio do aumento da sua eficiência. Neste sentido, o estudo visando o uso comercial

de inoculantes à base de FMAs é imprescindível para favorecer aspectos da nutrição da erva-mate, uma vez que a sustentabilidade da produção florestal está ligada aos efeitos benéficos das micorrizas sobre as plantas, especialmente nos nutrientes mais limitantes do solo, como é o caso do P.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar os efeitos da inoculação micorrízica e doses de fósforo (P) no crescimento inicial, produção de matéria seca e nutrição fosfatada em plantas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.).

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a resposta de crescimento em altura de parte aérea e diâmetro de coleto, produção de matéria seca de raízes, caule e folhas e teor e acúmulo de P em plantas de erva-mate submetidas à diferentes doses de P.
- Verificar se a inoculação das plantas com fungos micorrízicos arbusculares influencia no crescimento, produção de matéria seca e estado nutricional de P da erva-mate.
- Identificar se existe interação entre a inoculação micorrízica e diferentes doses de P sobre o desenvolvimento e nutrição fosfatada de plantas de erva-mate.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Erva-mate

3.1.1. Distribuição geográfica e fitoecologia

Segundo Lorenzi (2008), a erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil), também chamada simplesmente de mate, erveira, congonha, entre outros, é uma árvore perene que ocorre em cerca de 5% do território brasileiro, se estendendo desde o Mato Grosso do Sul e São Paulo, até o Rio Grande do Sul, sendo mais abundante nos três estados do sul do país. Trata-se de uma espécie originária das regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, a qual se destaca em suas formações florestais caracterizadas como Floresta Ombrófila Mista, conhecidas como Mata de Araucárias (CARVALHO, 2003; CUBAS, 2015; GERHARDT, 2013).

Apesar de sua afinidade com a Floresta com araucárias (*Araucaria angustifolia*), Carvalho (2003) salienta que a erva-mate também é encontrada de forma incomum na Floresta Ombrófila Densa (Floresta Atlântica) e Cerradão, no estado de São Paulo. Alguns autores ainda afirmam ocorrência rara em Minas Gerais e Rio de Janeiro, provavelmente acompanhando pequenas porções de indivíduos de araucária (OLIVEIRA e ROTTA, 1985; VILELA, 1996). Para os mesmos autores, o prolongamento da área de ocorrência natural em direção ao Mato Grosso do Sul deve-se, possivelmente, entre outros fatores, à entrada de massas frias provindas do sul do continente sul-americano. Os mesmos apontam, ainda, o fato de que no estado de Minas Gerais a planta era frequentemente confundida, passando a se ter clareza de sua presença apenas em 1972, mesmo que em pequenas porções.

Para Cruz (2021), a ocorrência da erva-mate coincide aproximadamente com as grandes bacias hidrográficas dos rios Paraná, Paraguai, Iguaçu e Uruguai, além de algumas de suas sub-bacias hidrográficas. No Brasil, esta abrangência estaria aproximadamente entre as latitudes 21°S e 30°S e as longitudes 48°W e 56°W (CROGE; CUQUEL; PINTRO, 2021).

Além disso, a partir do oeste do Paraná, a área de ocorrência da erva-mate ultrapassa o Mato Grosso do Sul e atinge a Argentina, abrangendo parte da província de Misiones e de Corrientes, sendo encontrada naturalmente no nordeste deste país (OLIVEIRA e ROTTA, 1985). Ainda fora do Brasil, é encontrada no leste do Paraguai, na região da Serra de Amambay-Mbaracayú e

no norte do Uruguai (CARVALHO, 2003). Entretanto, há de se notar que conforme apontam diversos pesquisadores, a distribuição da planta não se faz pelas áreas litorâneas das regiões de ocorrência citadas anteriormente (FERREIRA FILHO, 1948; TARAGÓ, 1976; KLEIN, 1969 *apud* OLIVEIRA e ROTTA, 1985).

Constata-se que faz parte do hábito natural da erva-mate acompanhar a presença de nichos de *Araucaria angustifolia*, assim como descrito por Carvalho (2003), o qual afirma que a espécie cresce nas associações mais evoluídas dos pinhais, sendo considerada uma espécie clímax tolerante à sombra. Os autores Oliveira e Rotta (1985) afirmam:

Comparando-se as áreas de distribuição de araucária e da erva-mate, pode-se concluir que, a grosso modo, as duas espécies tendem a se apresentar sempre juntas, devendo-se, provavelmente, à aptidão pelas terras dos planaltos. Entretanto, podem ser encontradas áreas de pinheiros em que a erva-mate não se acha presente, assim como ervais com ausência de pinheiros (OLIVEIRA e ROTTA, 1985).

Desta forma, é possível inferir que ocorre exceção à presença da erva-mate em regiões caracterizadas pela ausência de pinheiro-araucária, da mesma forma, podem ocorrer zonas de campos naturais dentro da área de dispersão em que não se encontram populações de erva-mate. Neste contexto espacial tão vasto, são englobadas diferentes situações climáticas e topográficas, que emprestam uma diversidade de condições ecológicas às áreas de ocorrência da espécie, e que leva a constatação de grande variabilidade genética intraespecífica relacionada à sua distribuição e à sua forma de reprodução (GERHARDT, 2013).

A ocorrência natural de erva-mate se concentra em áreas de 400 a 1800 metros de altitude, entretanto, na Região Sul a planta pode ocorrer em altitudes inferiores a este mínimo, como por exemplo, no município de Foz do Iguaçu (CARVALHO, 1994; OLIVEIRA e ROTTA, 1985). Segundo os mesmos autores, a precipitação média anual está em torno de 1500 milímetros, mas pode variar entre 1100 e 2300 milímetros, que costumam ocorrer de forma uniforme e estacional, com chuvas concentradas no verão, com estação seca pouco pronunciada no inverno, podendo haver deficiência hídrica leve no noroeste do Paraná e sul de Mato Grosso do Sul. Quanto às temperaturas das áreas de

ocorrência, podem variar de 12°C a 24°C, com maior distribuição de 15°C a 18°C (CARVALHO, 1994; OLIVEIRA e ROTTA, 1985).

3.1.2. Características gerais

Conforme suas características, a erva-mate é classificada taxonomicamente como pertencente às angiospermas (divisão Magnoliophyta), sendo que acordo com o sistema de Classificação de Cronquist é englobada na classe Magnoliopsida (eudicotiledôneas), e na Ordem Celastrales (CARVALHO, 1994).

Atualmente, pertencente à família Aquifoliaceae, a planta foi primeiramente classificada pelo viajante e pesquisador naturalista francês August de Saint-Hilaire. De 1816 a 1824, em viagem de estudos ao Brasil, o pesquisador coletou o material da espécie nos arredores de Curitiba, nomeando-a de "*Ilex paraguariensis*" em 1822, provavelmente porque na época a espécie era conhecida como "erva-do-paraguai", o que influenciou o nome específico (CARVALHO, 2003; DANIEL, 2009). Para Cruz (2021), a etimologia de "paraguariensis" está ainda relacionada à pequena cidade paraguaia com o nome de Paraguari, já para Oliveira e Rotta (1985) existe a possibilidade de o naturalista tê-la encontrado primeiramente no Paraguai, mesmo que a maior distribuição da planta seja no Brasil. Conforme estudos realizados recentemente por Bruxel *et al.* (2018) existem pelo menos outros 24 sinônimos na literatura que foram atribuídos à espécie *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil, segundo levantamento realizado pelo autor, possivelmente devido às variações morfológicas que causaram dificuldade na identificação correta da espécie e pela dificuldade de troca de informações entre cientistas à época.

Quanto ao gênero *Ilex*, é o único incluído na família, estão nele contidas algumas centenas de espécies, sendo que aproximadamente duzentas são nativas da América do Sul, e desse esse total, 58 ocorrem distribuídas em quase todos os estados do Brasil, sendo 42 endêmicas do país (SOUZA; LORENZI, 2012).

Como as outras plantas angiospermas, a erva-mate possui sementes, flores e frutos, e um ciclo de vida distinto (RAVEN *et al.*, 2014). Cabe lembrar que o nome angiosperma deriva da palavra grega "*angeion*", que significa recipiente ou urna, e "*sperma*", que significa semente. As angiospermas

representam a maior divisão de plantas do mundo, e seu nome faz referência à presença de carpelos desenvolvidos para proteger as sementes (FORZZA *et al.*, 2010; RAVEN *et al.*, 2014).

Conforme Carvalho (2003), a planta de erva-mate possui flores pequenas, brancas e pouco vistosas. Em relação a sua biologia reprodutiva, a erva-mate é um comportamento de planta dioica (unissexual em árvores diferentes) com inflorescências fasciculadas e pedunculadas, que nascem em ramos maduros e destinados à floração, se inserem nas axilas foliares (EDWIN e REITZ, 1967; ZANON, 1988). A erva-mate é uma planta monoica (com flores masculinas e femininas na mesma planta) e que possui flores andrógenas ou bissexuais (espécies que apresentam estame e carpelo ou pistilo reunidos na mesma flor), mas estas se tornam unissexuais por aborto de um dos sexos: nas flores femininas os estames são inoperantes (rudimentares) e nas masculinas, os pistilos se deprimem e a flor aborta (CARVALHO, 2003; LORENZI, 2008), deixando a planta com um comportamento dioico.

Considerando sua dioicia, é possível determinar se a planta é feminina (ginoesporangiada) ou masculina (androesporangiada), por uma observação cuidadosa de suas partes reprodutivas, todas as flores num mesmo indivíduo portarão o mesmo tipo de esporângio (DANIEL, 2009). Assim, pode-se considerar a não ocorrência de autopolinização promovendo a alogamia das populações da espécie, favorecendo a polinização aleatória cruzada (SOUSA *et al.*, 2003). Isso implica em diferenças de genótipo e de fenótipo que são importantes para a resistência e estabilidade da espécie (GERHARDT, 2013).

O florescimento da planta ocorre de setembro a novembro no Paraná, de setembro a dezembro em Santa Catarina, e de setembro a outubro no Rio Grande do Sul. Enquanto em árvores provenientes de sementes a reprodução se inicia a partir dos cinco anos, nas oriundas de propagação vegetativa o processo reprodutivo pode iniciar em dois anos (CARVALHO, 1994, 2003; CORRÊA *et al.*, 1999).

A polinização das flores da espécie é assegurada pela presença de insetos, tratando-se assim, de uma planta entomófila que segundo Bruxel *et al.*, (2018), tem a polinização realizada pelas ordens Coleoptera, Diptera e Hymenoptera, tomando esta última especial importância. Quanto à produção de sementes, Zanon (1988), recomenda aumentar o número de agentes

polinizantes no erval, incluindo a presença de colmeias, além da manutenção de três plantas femininas para uma planta masculina.

A erva-mate tem seu tamanho variável conforme o manejo de cultivo, costumando ser conduzida em áreas comerciais na forma de arvoreta, oscilando entre três e cinco metros, entretanto, podem formar-se árvores de até 30 metros em áreas naturais, atingindo os 100 cm de DAP na idade adulta (CARVALHO, 2003). Segundo o mesmo autor, o tronco costuma ser reto ou levemente tortuoso, apresentando o fuste geralmente curto, mas que sem a devida condução pode chegar aos onze metros de comprimento. A casca externa é cinza clara ou acastanhada, variando de áspera a rugosa, tem quantidade significativa de lenticelas que podem, inclusive, formar linhas características (CARVALHO, 1994).

Conforme Carvalho (2003), as folhas da espécie são simples e de coloração verde-escuras na face adaxial e mais claras na face abaxial. Esse fato parece estar ligado à própria ecologia da planta, que provavelmente desenvolveu adaptações para aproveitar melhor a incidência de luz solar, concentrando clorofila de forma mais elevada em suas folhas, o que confere a cor verde escura característica dos exemplares observados na mata, uma vez que, costumam habitar partes médias e inferiores, relativamente sombreadas. (LINDMAN E FERRI, 1974). Além disso, não possuem a presença de pelos e por isso são chamadas de glabras, são simples, alternadas, subcoriáceas ou coriáceas (CARVALHO, 1994, 2003; LORENZI, 2008).

O pecíolo é geralmente curto, com colorações que variam de arroxeadado, amarelado e até mesmo branco (BRUXEL *et al.*, 2018). As folhas costumam variar de cinco a dez centímetros de comprimento por até quatro centímetros de largura, mas em trabalho realizado por Costa (2005), observou-se que as folhas podem chegar a dimensões muito maiores no interior de matas nativas, como reflexo da baixa intensidade de luminosidade solar.

A espécie pertence ao grupo sucessional clímax, é esciófita, ou seja, aceita sombreamento em qualquer etapa de seu desenvolvimento, tolerando maior luz na fase adulta, e seletiva higrófila. Embora seja ombrófila, se desenvolve bem sob a luz direta do sol, excetuando-se a fase de muda (DANIEL, 2009). Lorenzi (2008), afirma que as populações de erva-mate costumam formar capões homogêneos, seus frutos amadurecem entre janeiro e março. Segundo

Daniel (2009), sua dispersão é zoocórica, pois, quando maduros, os frutos são consumidos por pássaros, especialmente sabiás, os quais disseminam as sementes por meio de suas fezes. Conforme Zanon (1988), o início da maturação das sementes da erva-mate é a ocorrência da mudança gradativa de coloração dos frutos. Após a coloração verde, eles passam para a vermelha e, quando maduros, apresentam coloração violeta-escuro, porém o mesmo autor chama a atenção sobre a heterogeneidade da maturação dos frutos, e consequentemente das sementes:

Em árvores de erva-mate, como na maioria das espécies nativas do sul do Brasil, a maturação dos frutos não é homogênea. São encontrados, na época normal de colheita, frutos verdes, fisiologicamente maduros e passados. Esta heterogeneidade de maturação dos frutos, variável na árvore e entre árvores, constitui um difícil problema para a colheita em quantidade de semente de alta qualidade. A maturação dos frutos e das sementes varia dentro de indivíduos, entre anos de colheita e entre condições ambientais. As condições atmosféricas típicas de dias quentes, secos e ensolarados, favorecem a maturação (ZANON, 1988).

A heterogeneidade das sementes de erva-mate leva a uma série de dificuldades na produção de mudas advindas da reprodução sexuada, além da variação de qualidade entre as mudas, ocorre germinação desuniforme, devido à dormência fisiológica, decorrente da imaturidade do embrião, e dormência tegumentar pelo endocarpo lenhoso (KRATZ *et al.*, 2015; ZANON, 1988). Apesar de relativamente demorada, a produção de mudas provenientes de sementes ainda costuma ser a mais utilizada pelos produtores de erva-mate, especialmente devido ao seu baixo custo (FOWLER e STURION, 2000; WENDLING e BRONDANI, 2015).

3.1.3. Características históricas e econômicas

Antes mesmo de serem popularizadas, as folhas de erva-mate já eram beneficiadas e consumidas pelas populações originárias das bacias dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai, especialmente pelos guaranis que a usavam na produção de um estimulante, denominado atualmente de “*ka’ay*”, principalmente consumido em contextos religiosos (OLIVEIRA; ESSELIN, 2015). A erva-mate também foi bastante utilizada por outras etnias nativas a fim de produzir bebidas

semelhantes, inclusive entre comunidades originárias do Chaco e dos Andes, locais que não tem a planta como endêmica. A própria palavra “mate” deriva do quéchua (língua nativa da região central dos Andes), em que o vocábulo “*mati*” quer dizer cabaça ou porongo, recipiente no qual as bebidas energéticas eram preparadas e servidas (OLIVEIRA; ESSELIN, 2015). O mesmo autor cita tal fato como indício de que a erva-mate há muito vem circulando em uma ampla extensão territorial na região sul-americana.

Através das tradições herdadas dos povos indígenas mencionados anteriormente, a produção e extração de produtos advindos da planta de mate se tornou atividade de fundamental importância para o Sul do Brasil, gerando emprego e renda para inúmeros produtores rurais de pequeno e médio porte, grande parte destes de cunho familiar (OLIVEIRA, 2022). Nestes locais a erva-mate é comumente produzida dividindo espaço com outras atividades como a bovinocultura leiteira, a integração de suínos e de frangos, a fruticultura e até mesmo a produção de grãos, porém, cada vez mais se vislumbra o cultivo dos ervais como a principal fonte de renda do produtor (CHECHI; SCHULTZ, 2019).

Ainda hoje, a exploração da espécie consiste principalmente na colheita de folhas e ramos finos das árvores após maturação foliar (SANTIN *et al.*, 2019), que são utilizados principalmente na forma de chimarrão, tererê e chás (CROGE; CUQUEL; PINTRO, 2021), hábitos de uso incorporados amplamente pela população dos três estados do sul do país, em especial, onde suas propriedades e características são exploradas com um grande potencial comercial. Saidelles *et al.* (2010) apontam que, devido a sua importância em uma ampla gama de aspectos, atualmente ocorre uma crescente no desenvolvimento científico sobre sua economia, envolvimento crítico sobre o aspecto social, estudos culturais e manifestações folclóricas sobre o mate.

Historicamente, a erva-mate figura como uma ilustre condutora da consolidação social e cultural do Sul do Brasil, e dos países que fazem fronteira com essa região geográfica, no decorrer dos anos, a produção da erva-mate passou por avanços em seu modelo de cultivo e beneficiamento, tornando-se popular aos imigrantes europeus que passaram a formar grande parte do setor agrícola do Sul do país (CEDERVA, 2021). A erva-mate já foi considerada o principal produto da economia paranaense, recebendo inclusive o título de “ouro verde”, sendo peça chave para o início da industrialização do estado do Paraná

(AGUDO, 2020). Em alguns municípios a erva-mate é altamente ligada aos arranjos produtivos locais, estando presente até mesmo no brasão dos municípios (CHECHI e SCHULTZ; 2019).

Além dos produtos típicos das folhas da erva-mate, o aproveitamento da planta vem aumentando devido aos novos usos que estão em expansão, como por exemplo, a produção de medicamentos fitoterápicos, cosméticos, e na forma de blends (combinação da erva-mate com outras ervas e aromatizantes), energéticos e até mesmo cervejas (SAIDELLES *et. al.*, 2010), não só no Brasil, mas da mesma forma em vários países, tais como Itália, Espanha, Estados Unidos, França, Coreia, Austrália, Japão, Alemanha, Rússia e Síria (CARDOZO JUNIOR e MORAND, 2016). A expansão do uso está relacionada com a elucidação de suas propriedades como antioxidante, antimicrobiano, sendo rica em metilxantinas, cafeína e teobromina; flavonoides; vitaminas A, B, C e E; saponinas e taninos, características que aguçam o mercado consumidor externo. (CROGE; CUQUEL; PINTRO, 2021).

Além disso, o preço tem estimulado os produtores internos que aproveitam o aumento da cultura do mate nas fronteiras nacionais (JUNKEIRA *et al.*, 2017; JÚNIOR; FOCKINK, 2017). Nos arranjos de produção do estado do Rio Grande do Sul, o produto é destinado para o mercado interno, especialmente na forma verde moída, enquanto, no Paraná e Santa Catarina, a produção se destina ao mercado externo, com a produção da erva-mate envelhecida (CHECHI; SCHULTZ; 2019).

Conforme Santos *et al.*, (2003), o aumento na expansão da importância da árvore de erva-mate vai ao encontro das preocupações globais com a recuperação do meio ambiente e da revalorização dos povos e culturas tradicionais. Atualmente, seu cultivo e manejo figuram dentre as principais atividades do mercado de produtos florestais não madeireiros do Brasil, tornando-se a principal atividade do tipo na região Sul (JÚNIOR; FOCKINK, 2017), isso permite a geração de trabalho e renda, além da sustentabilidade, pois sua produção é compatível com a conservação da fisionomia vegetal nativa, uma vez que, grande parte da produção é retirada de ervais nativos ou sombreados (CRUZ, 2021). Desta forma, a exploração das folhas e ramos da erva-mate é um meio de manter os remanescentes de vegetação, especialmente na Floresta Ombrófila Mista, ao mesmo tempo que garante renda aos produtores

rurais. Para Wendling e Santin (2014) a produção de ervais é um dos sistemas florestais e agroflorestais de maior equilíbrio ecológico do país.

De acordo com o autor Murkerji (1997), a utilização dos produtos florestais não madeireiros é considerada uma prática antiga, na qual os recursos da floresta podem ser considerados como fonte alimentícia, estrutural, medicinal, estética, entre outras finalidades. Estima-se que produção de erva-mate se encontra em pelo menos 560 municípios brasileiros enquanto estimativas apontam para a geração de mais de 710 mil empregos apenas na forma direta para o ano de 2015. Tal fato é explicado por Marinheski (2017), pois, no momento da colheita há uma grande demanda de mão de obra na poda das folhas e galhos mais finos, que são empacotados em raídos, uma técnica de amarrar o produto a ser transportado até a indústria.

3.2. Influência nutricional na erva-mate

3.2.1. Manejo nutricional geral

As exigências nutricionais da planta de erva-mate foram pouco estudadas no passado (GAIAD e LOPES, 1986), grande parte disso se deve por ser uma planta considerada tolerante a solos de baixa fertilidade natural, sendo mais frequente em solos com baixo teor de nutrientes trocáveis e alto teor de alumínio (CARVALHO, 1994), sendo na década de 80 considerada resistente aos solos degradados. Conforme sua distribuição natural, não ocorre em solos hidromórficos, prefere solos úmidos e bem drenados, preferindo solos profundos a medianamente profundos, como os Latossolos (OLIVEIRA e ROTTA, 1985). Embora a textura dos solos da região de ocorrência seja muito variável, a erva-mate prefere as terras que mostram equilíbrio na composição de areia, silte e argila. Adapta-se melhor em solos de texturas média e argilosa (CARVALHO, 1994).

Diferente da situação passada, o manejo nutricional dos ervais tem ganhado destaque na comunidade científica nos últimos anos, devido ao aumento do interesse na produção da planta e as novas utilidades que lhe estão sendo relacionadas. Tal fato é imprescindível para a manutenção da produtividade da erva-mate, uma vez que, em seu cultivo sofre cada vez mais com a grande exportação de nutriente, devido ao aumento da intensidade das

podas para retirada do material comercial, especialmente as folhas e ramos finos (SANTIN *et al.*, 2017).

Conforme Santin *et al.*, (2019) a erva-mate era originalmente explorada em meio a florestas nativas em intervalos de 36 a 48 meses entre colheitas, o que aumentava a capacidade da ciclagem de nutrientes do ecossistema, e que poderia levar ao suprimento nutricional das esparsas plantas colhidas na área. Porém, com o passar do tempo e a evolução da atividade, as árvores presentes nas áreas de extração de erva-mate começaram a ser suprimidas dando origem aos sistemas de produção adensados, ou até mesmo em pleno sol. Nestas novas formas de cultivo, a nutrição do erval que já poderia estar inadequada fica ainda mais comprometida devido a menor reposição por ciclagem de nutrientes relacionada às outras espécies que estão presentes na área cultivada ou de extração (GAIAD; LOPES, 1986).

O exposto acima pode ter influência na perda de interesse por parte de alguns produtores na atividade, pois, apesar da crescente procura pela erva-mate observa-se que muitos podem estar deixando a atividade devido à diminuição da produtividade e a perda do vigor dos ervais na forma atual de cultivo (GOULART; SANTIN; BRASILEIRO, 2022), fato que pode estar fortemente ligado, entre outros fatores, ao esgotamento da fertilidade do solo associado, ou não, às podas excessivas.

Entretanto, percebe-se que o aumento da produtividade da planta de erva-mate está fortemente correlacionado ao aumento da frequência de práticas de manejo do solo utilizadas pelos produtores, destacando-se entre elas o manejo da fertilidade do solo, por outro lado, observa-se que grande parte dos produtores costuma fazer a fertilização do erval sem conhecer a demanda nutricional da cultura, o que pode ser economicamente inviável e prejudicial à própria planta (GOULART; SANTIN; BRASILEIRO, 2022). Neste sentido, cada vez mais, buscam-se alternativas para suprir as demandas nutricionais da espécie, conservando sua produtividade.

3.2.2. Interação entre o fósforo, o ambiente e a planta

Entre os muitos nutrientes importantes para as plantas, Gaiad e Lopes (1986), na década de 80 já destacavam a importância do estudo do suprimento

de fósforo (P) para as plantas de erva-mate, pois, o nutriente se mostrava em níveis muito baixos nas áreas de produção e de pesquisa.

Para Malavolta (2006), o P figura como um dos nutrientes de maior destaque em estudos, não só pela sua importância na biota, mas por sua deficiência limitar significativamente a produção das plantas cultivadas, principalmente nas regiões tropicais. Lopes (1983) já indicava há anos que a quantidade de P disponível às plantas em regiões pedologicamente evoluídas frequentemente se apresenta abaixo dos níveis críticos recomendados para inúmeros cultivos.

Reissmann et. al., (1983) salientam a possibilidade de baixos níveis de P no tecido foliar da planta sem que a planta de erva-mate demonstre sintomas de deficiência, devido aos mecanismos de adaptação por ela desenvolvidos. Entretanto, Santin *et al.* (2013) confirmaram que a erva-mate é exigente em P, havendo maior crescimento das plantas quando na faixa adequada, sendo um dos nutrientes que mais implica em diferenças no crescimento do vegetal, desde que não ocorra desbalanço com outros nutrientes. A erva-mate cresce bem em solos com altos teores de P, mas, a maximização do crescimento das plantas depende da boa disponibilidade de N, K e Ca. Trabalhos realizados pelo mesmo autor mostram que a erva-mate responde positivamente à adubação fosfatada, com aumento de produtividade (SANTIN *et al.*, 2017).

O P no solo costuma ser proveniente do intemperismo dos minerais primários fosfatados como os do grupo das apatitas, sendo re combinado em minerais secundários mais estáveis termodinamicamente, ou incorporados a compostos orgânicos biologicamente (GATIBONI, 2003). O fosfato proveniente dos minerais apatíticos chega à solução do solo, com o avanço da pedogênese, na forma do ânion fosfato trivalente (PO_4^{3-}). Devido a suas características químicas, o fosfato rapidamente é hidratado por moléculas de H_2O , sofre protonação (adição de hidrogênio iônico) e seu estado de valência é alterado, formando ânions diversos conforme o pH. Conforme a constante de equilíbrio químico das reações envolvendo ânion fosfato, em valores de pH ocorridos nas situações mais comuns de solo no Brasil, haverá o predomínio do P na forma dos ânions fosfato mono e bivalente, conforme o exposto por Rheinheimer *et al.* (2020):

Em valores de pH em torno de 2, metade da concentração do ácido fosfórico (H_3PO_4) dissociará seu primeiro próton ($\text{pK}_1 = 2,15$), cujo ânion H_2PO_4^- predominará até pH próximo a 7 ($\text{pK}_2 = 7,20$), quando a metade do fosfato monovalente (H_2PO_4^-) dissociará o segundo próton, formando HPO_4^{2-} (RHEINHEIMER *et al.*, 2020).

As taxas de absorção de fosfato da solução são maiores entre pH 4,5 e 6,0, na qual a forma H_2PO_4^- é predominante, indicando que o P é preferencialmente absorvido nesta forma (SENTENAC e GRIGNON, 1985).

De forma geral, os solos brasileiros apresentam baixos teores de P na solução do solo, pois grande parte desse nutriente encontra-se fortemente sorvido aos colóides do solo (SANTOS *et al.*, 2011). Assim, é importante destacar que nem todo o P presente no solo estará disponível para a absorção radicular devido à forma do fosfato reagir com os demais compostos do solo. As reações das quais o P participa no solo pode, muitas vezes, levar a sua fixação, sendo este um termo genérico empregado para traduzir a transformação de formas solúveis do P em outras formas de menor solubilidade (CATANI; PELLEGRINO, 1960).

Os mecanismos de fixação do P inorgânico podem variar conforme as características do solo, mas costumam ser de extremo impacto em grande parte dos solos brasileiros. Como outros solos altamente intemperizados da região tropical, parte expressiva dos solos brasileiros são ricos em argilas do grupo caulinita, óxidos de ferro e de alumínio, e a baixa disponibilidade do P está envolvida com sua afinidade pela superfície desses argilominerais, na qual realiza ligações covalentes (adsorção específica) (GATIBONI, 2003). Tanto os ânions de fosfatos monovalentes quanto os bivalentes tendem a formar complexos de esfera interna com os grupos funcionais aluminol (Al-OH) da caulinita e ferrol (Fe-OH) e aluminol (Al-OH) dos óxidos. Tal fato ocorre, pois mesmo protonado, o oxigênio do fosfato busca por um átomo mais reativo que o hidrogênio para conversão em uma molécula mais estável termodinamicamente (RHEINHEIMER *et al.*, 2020). Assim, através de uma reação de troca de ligantes ocorre a modificação de Al-O(H) ou Fe-O(H) para Al-O-P ou Fe-O-P, respectivamente. Inicialmente, o fenômeno de adsorção ocorre em fase rápida, por atração eletrostática entre o ânion fosfato e a superfície do mineral e, posteriormente há a troca de ligantes (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Além disso, não é apenas o fosfato proveniente do solo que pode sofrer reações com a fração mineralógica do solo, o fosfato proveniente de fertilizantes também interage com coloides através da troca de ligantes, sendo que a labilidade do P depende da energia de ligação do fosfato no produto final da reação química (GATIBONI, 2003). A energia da ligação está relacionada à quantidade de oxigênios deslocados dos grupos funcionais dos minerais do solo, sempre que possível, o fosfato deslocará oxigênio de dois grupos funcionais. De forma mais comum, costuma-se observar a formação de complexos monodentados (deslocamento de um oxigênio do cátion estruturante) e bidentados (RHEINHEIMER *et al.*, 2020).

A adsorção de fosfatos da solução do solo pelos grupos funcionais de superfície é imediata e sempre inicia de forma monodentada na caulinita, mas sempre evoluirá para formas de ligação múltiplas em óxidos, especialmente, na goethita, lepidocrocita e ferrihidrita, em função da existência de sítios de adsorção vizinhos compatíveis com a distribuição espacial dos oxigênios do fosfato. A ligação bidentada de P ao solo exprime força altamente estável, transformando o P na forma não lábil, desta maneira não haverá reposição de P pela fase sólida, diminuindo drasticamente as concentrações de P na solução do solo (NOVAIS *et al.*, 2007; ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Assim, as complexas interações que envolvem os fenômenos de adsorção de P nos solos intemperizados justifica o despertar do interesse no estudo e utilização de métodos que possam promover o melhor aproveitamento deste nutriente pelas plantas, aumentando a eficiência, por exemplo, das adubações fosfatadas, inclusive nos plantios de erva-mate. Para Costa *et al.* (2006) além da relação do P com os coloides do solo, o transporte do nutriente no ambiente afeta diretamente sua absorção pelo sistema radicular da planta, sendo que, o P tem a difusão como mecanismo mais expressivo nessa dinâmica, o que limita ainda mais a absorção nas quantidades requeridas pelas plantas.

A taxa de difusão de fosfato nos solos é baixa, o que juntamente com sua rápida absorção radicular leva a formação de um volume de depleção do nutriente em volta da raiz (RAUSCH e BUCHER, 2002). Após um curto período de dias sendo absorvido, o P disponível pode reduzir em até metade do valor inicial, fazendo com que a zona de depleção chegue a aproximadamente dois milímetros da superfície radicular (JUNGK, 1987).

Harper *et al.*, (1991) afirmam que a proximidade entre a superfície absorptiva da raiz e a fonte de P é fator chave para garantir o nutriente para a planta, conforme o mesmo autor, plantas com muitas raízes e pelos radiculares podem ser mais eficientes nesse sentido.

Entretanto, as células vegetais apresentam uma elevada concentração de fosfato em seu citoplasma quando comparadas às concentrações da solução do solo ou do apoplasto (ARAÚJO E MACHADO, 2006; VASCONCELOS *et al.*, 2021), fazendo com que os transportadores proteicos tenham que mover os solutos contra um gradiente de potencial eletroquímico, com consumo de energia, recebendo este processo o nome de transporte ativo (TAIZ; ZEIGER, 2010).

Para que o fosfato adentre a célula vegetal, ocorre o processo de transporte ativo primário, no qual se faz necessária a geração de um forte gradiente eletroquímico, realizado por uma bomba que promove a extrusão de prótons através do plasmalema, retirando o íon H⁺ do interior das células, o que leva tanto à diferença de potencial elétrico (interior negativo), quanto à diferença de pH (JONES *et al.*, 2013; SMITH, 2002; TAIZ; ZEIGER, 2010).

A absorção de P através da membrana celular costuma ser outro ponto de importância, uma vez que ocorre grande gasto energético envolvido na sua dinâmica, evidências experimentais indicam que existem proteínas membranares que funcionam como transportadores de alta afinidade que são induzidos quando ocorre deficiência de P, enquanto proteínas transportadoras de fosfato de baixa afinidade operam em concentrações mais elevadas do nutriente (NUSSAUME *et al.*, 2011; VASCONCELOS *et al.*, 2021). As proteínas transportadoras estão inseridas na membrana em blocos alternados de aminoácidos hidrofóbicos e hidrofílicos, permitindo ao fosfato atravessar a bicamada de fosfolípidos (TAIZ; ZEIGER, 2010), promovendo, assim, o transporte ativo secundário. No transporte ativo secundário do P, as proteínas transportadoras utilizam o gradiente iônico causado pelo transporte ativo primário para mover um segundo íon contra o seu gradiente eletroquímico (JONES *et al.*, 2013), ou seja, ocorre o co-transporte do tipo simporte, no qual dois solutos atravessam simultaneamente a membrana. Tal fato é exposto por Schachtman *et al.* (1998), que afirmam que a despolarização do plasmalema

após a absorção do fosfato indica sua absorção através de um simporte com cátions, principalmente o H⁺.

Por fim, Costa *et al.* (2006) reforçam a importância da microbiota da rizosfera associada às diversas morfologias radiculares na absorção e disponibilização de P para os vegetais, estando entre estes organismos os chamados fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que podem afetar positivamente a nutrição da planta. Atualmente, as associações entre plantas e FMAs vêm sendo estudadas há algumas décadas, despontando como possível forma de melhorar a nutrição fosfatada das plantas cultivadas, entretanto sua aplicação em larga escala ainda não é consolidada, especialmente pela necessidade de técnicas na propagação de inóculos (ANTONIOLLI; KAMINSKI, 1991).

3.2.3. Efeitos do fósforo na nutrição vegetal

O P é um macronutriente que costuma apresentar uma baixa eficiência de absorção, especialmente devido sua interação com constituintes do solo, ficando adsorvido em seus colóides, além disso, apresenta lentas taxas de difusão na solução do solo, fatores que o tornam menos prontamente disponível na rizosfera, mesmo quando adicionado através de fertilizantes (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

Segundo Taiz *et al.* (2017), o P é um nutriente que participa de vários processos metabólicos vegetais, como a transferência de energia, fazendo parte de compostos energéticos como monofosfato de adenosina (AMP), adenosina difosfato (ADP) e Adenosina trifosfato, produzido, principalmente, nas fosforilações oxidativas e fotossintéticas. A célula viva gasta ATP em seus processos que exigem energias externas, participando da síntese e desdobramento de óleos e gorduras e da absorção salina pela planta. A ligação fosfatada com alta energia é um meio para armazenar e usar grandes quantidades de energia. O ATP é necessário para a fotossíntese, translocação e muitos outros processos metabólicos de relevância. A estrutura trivalente do íon fosfato confere a capacidade de realizar duas ligações estáveis e ainda ser ionizado, tornando-o insubstituível (WESTHEIMER, 1987).

Ainda, está presente na síntese de nucleotídeos, sendo o fosfato um componente integral do material genético (DNA/RNA). A função principal do P

no DNA é a de formar uma ponte estrutural entre os nucleosídeos, formando macromoléculas, além de ter papel na síntese e estabilidade de membrana celular (fosfolípidios de membranas) (TAIZ *et al.*, 2017)

Pela sua importância em reações ligadas ao metabolismo e uso do nitrogênio pela planta, como no caso da fotossíntese e metabolismo do carbono, o P está intimamente ligado ao metabolismo do N, interagindo com este nutriente de forma sinérgica. Quanto ao N₂, a deficiência de P tem impacto negativo na sua fixação, devido à falta de energia dependente do ATP para os processos ligados à fixação (ARAÚJO; MACHADO, 2006).

3.3. Fungos micorrízicos arbusculares

Considerando-se a importância da nutrição de plantas, os impactos ambientais que podem estar atrelados à indústria, transporte e uso de fertilizantes e ainda os altos custos dos produtos e distribuição, torna-se necessária a busca por métodos alternativos que promovam a redução da adubação química. Nesse sentido o uso de micorrizas para favorecer aspectos da nutrição das plantas produzidas deve ser estudado, uma vez, que a sustentabilidade da produção florestal está ligada aos efeitos benéficos das micorrizas sobre as plantas, particularmente na nutrição fosfatada.

O termo micorriza é utilizado para denominar a associação interespecífica simbiótica entre determinados fungos do solo e as raízes de plantas (HOFFMANN; LUCENA; 2006; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Em geral, através dessa interação, a planta fornece ao fungo carboidratos e lipídeos necessários ao seu desenvolvimento, enquanto o fungo, por meio de suas estruturas externas (hifas), ajuda na absorção de nutrientes e água da solução do solo e os transporta para as plantas (SMITH; READ, 1997). Mais precisamente, o fungo estabelece relações tróficas com a planta, penetrando de forma inter e/ou intracelular no córtex de sua raiz, sem causar danos, o que os diferencia dos fungos patogênicos (VÊNIA *et al.*, 2006).

Para enfrentar as características adversas encontradas ao longo da evolução das plantas no ambiente terrestre, os vegetais desenvolveram estratégias a fim de reduzir o estresse e garantir sua sobrevivência e perpetuação, especialmente devido ao ciclo de vida sedentário que possuem (CRUZ *et al.*, 2017). As plantas estão, de maneira geral, em constante contato

com inúmeros outros organismos, ocorrendo desta forma, inclusive processos evolutivos integrados, sendo que o desenvolvimento da simbiose com FMAs um dos mecanismos adaptativos mais importante envolvendo as plantas e microrganismos (HOFFMANN; LUCENA, 2006; CLARK *et al.*, 2000). Inclusive, aponta-se que essa simbiose com fungos foi fundamental para a conquista de ambientes terrestres pelas plantas (SIMON *et al.*, 1993).

Segundo Morton (1990), os FMAs podem ser considerados primitivos, pois seus esporos são relativamente simples e poucas espécies têm capacidade para se associar a uma grande diversidade de plantas, o que corrobora com o fato, de até o conhecido no momento, destes microrganismos não conseguirem crescer na natureza sem uma planta hospedeira. Existem evidências do surgimento desse tipo de associação há aproximadamente 450 milhões de anos, acompanhando o surgimento e evolução das plantas no ambiente terrestre. Já se admite que as radículas das briófitas primitivas se desenvolveram associadas a este tipo de organismo, até que evoluíram os sistemas radiculares de plantas vasculares conhecidos atualmente ainda associados a esses fungos (BRUNDRETT, 2002; SCHÜBLER; SCHWARZOTT, 2001; REDECKER *et al.*, 2000). Desta forma, são considerados organismos de simbiose obrigatória com plantas, obtendo através desta interação os nutrientes para seu desenvolvimento, afinal, dependem de um hospedeiro vivo para cumprir seu ciclo de vida na natureza, ou seja, a produção de esporos. (SCHÜBLER; SCHWARZOTT, 2001).

Dentre todos os tipos de associações entre fungos e raízes, a mais comum na natureza é a que envolve as micorrizas do tipo arbuscular. Neste caso, ocorre o processo de penetração do fungo nas células do córtex pela invaginação do plasmalema, na sequência a hifa penetrante se ramifica dicotomicamente inúmeras vezes e fica totalmente envolvida por essa membrana que passa a se designar membrana periarbuscular (HENNIGAN, 2009), formando os chamados arbúsculos. Após a penetração, por vezes a diferenciação da hifa intracelular forma espirais ou enovelamentos (pelotões), ou ainda, esporos e vesículas no interior das células, sendo que estas últimas não são encontradas em todas as famílias de Glomeromycota (JALONEN, R. *et al.*, 2013; Gutjahr & Parniske, 2013).

O fungo micorrízico coloniza o córtex radicular sem danificar os tecidos vegetais, de modo que o contato fungo-planta possibilita a troca de água e nutrientes (ANTONIOLLI; KAMINSKI, 1991). A planta se beneficia com o aumento da área de contato hifa-solo, aumentando a superfície de absorção de água e nutrientes, principalmente os poucos móveis, como o P, favorecendo o desenvolvimento vegetal. Em contrapartida, o fungo é favorecido com suprimento de açúcar provenientes da fotossíntese e lipídeos da planta, cujo seu metabolismo não consegue sintetizar, além de manter suas estruturas protegidas no interior do córtex radicular (JALONEN, R. *et al.*, 2013; MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). A colonização das raízes por FMAs resulta em modificações na fisiologia, bioquímica e nutrição mineral da planta hospedeira, podendo modificar a absorção, translocação e utilização de nutrientes e água pela planta:

Essa simbiose tem sido considerada a mais importante de todas as que envolvem plantas. Essa associação é simbiótica, pelo fato de os organismos coexistirem em um mesmo ambiente físico, raiz e solo, e mutualista, porque, em geral, ambos os simbioses se beneficiam da associação. Ela é considerada como mutualista nutricional, em que a planta supre o fungo com energia para crescimento e manutenção via produtos fotossintéticos, enquanto o fungo provê a planta com nutrientes e água. Nesse sentido, essa simbiose amplia a capacidade de absorção de nutrientes por parte do simbiote autotrófico e, conseqüentemente, a sua competitividade interespecífica e produtividade (BERBARA *et al.*, 2006).

No caso das plantas, no entanto, existe uma faixa grande de resposta à simbiose, sendo classificadas quanto à dependência micorrízica em facultativas, obrigatórias ou não-micorrízicas (SMITH & READ, 1997). O caráter facultativo costuma ser observado em condições de solo com alta disponibilidade de nutrientes, em que plantas não desenvolvem FMAs. Nessas condições, a simbiose é inibida por meio de mecanismos genéticos controlados pela planta (LAMBAIS *et al.*, 2003). Segundo os mesmos autores, plantas que não desenvolvem FMAs costumam ter sofrido evoluções adaptativas, como por exemplo, sistema radicular bem desenvolvido, com muitas raízes finas e pelos radiculares, ou ainda apresentam outros mecanismos de simbiose, neste caso a colonização parece ser inibida devido à incompatibilidade genética, que impede o fungo de ultrapassar as primeiras camadas radiculares (ANTONIOLLI; KAMINSKI, 1991; LAMBAIS *et al.*, 2003).

Para Solaiman, *et al.* (2019), apesar de pouco compreendido, a disponibilidade de P no solo parece ser o mecanismo de maior influência na colonização por FMAs. Os mesmos autores apontam que quando a quantidade de P disponível no solo aumenta, a colonização pelos FMAs diminui. Tal fato parece estar ligado ao estado nutricional do P pela planta hospedeira, sendo considerado por Antonioli e Kaminski (1991) o mecanismo de resposta mais evidente sobre o efeito da relação entre os organismos, alterando a liberação de compostos radiculares, como flavonoides e estrigolactonas (MONTERO *et al.*, 2019) e estando relacionado à resposta genética a colonização por FMAs (Das *et al.*, 2022). Entretanto, níveis muito baixos de P no solo podem ser limitantes inclusive para os FMAs, que parecem responder em solos que apresentam baixo teor no nutriente, mas não extremamente baixo (COLOZZI-FILHO & SIQUEIRA, 1986; LEHMANN *et al.*, 2011).

Atualmente a associação entre árvores e FMAs têm sido consideradas uma alternativa para aumentar a disponibilidade de P para as plantas, promovendo maior absorção deste nutriente (COSTA *et al.*, 2012; SMITH & READ, 1997), passando a ser entendido um mecanismo adaptativo que permite maximizar a aquisição de P de uma forma que dispense menos energia que a própria produção de raízes (CLARK *et al.*, 2000). Além disso, estudos demonstram aumento na absorção de outros nutrientes como potássio, nitrogênio, cálcio, magnésio, ferro, manganês e boro, o que pode estar ligado ao desenvolvimento favorecido pelo maior suprimento de P à planta, que possivelmente, ainda pode ter um maior aproveitamento da solução do solo (DANIELS HETRICK, 1984).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local de estudo

Esta pesquisa foi suportada pelo Laboratório de Solos Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO (Irati-PR), Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva – CEFEP (Colégio Florestal, Irati-PR) e pelo Centro de Recursos Biológicos Johanna Döbereiner (CRB-JD) da Embrapa Agrobiologia, Seropédica-RJ, Brasil.

O experimento com a erva-mate foi conduzido no viveiro de produção de mudas florestais do Colégio Florestal de Irati-PR, localizado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (latitude 25° 30' 12,705" Sul, longitude 50° 38' 6,347" Oeste, e altitude de 880 m acima do nível do mar) (Figura 1).

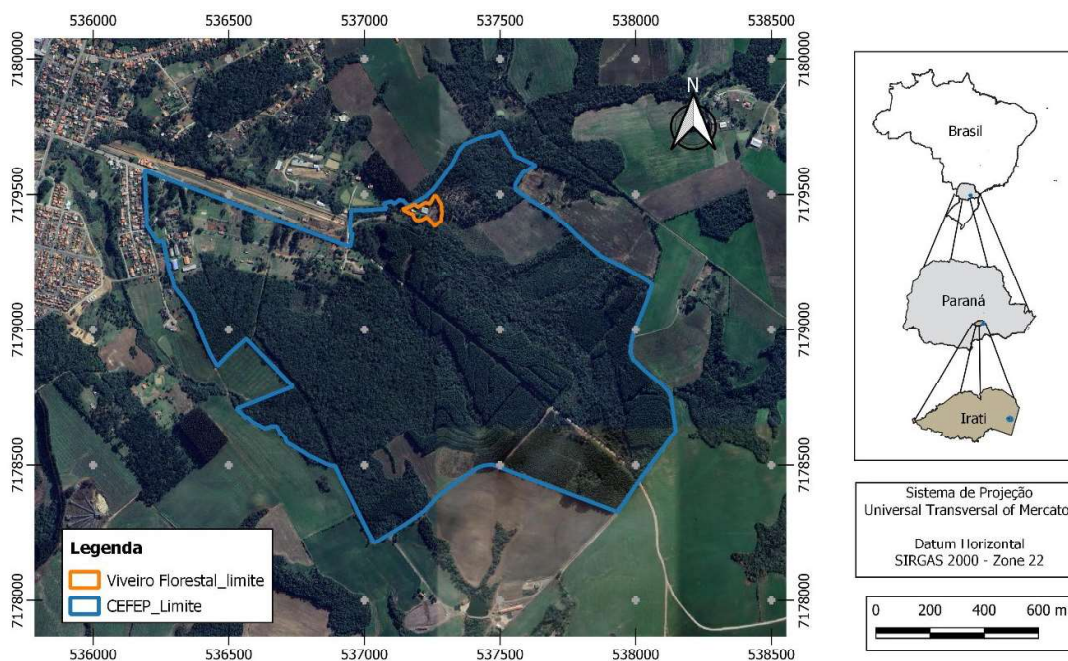


Figura 1. Imagem georreferenciada da localização do viveiro de produção de mudas de espécies florestais do Centro Estadual Florestal de Educação Profissional Presidente Costa e Silva (CEFEP), situado na periferia da área urbana do município de Irati, região Centro-Sul do estado do Paraná, Brasil (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação aclimatizada. Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, Irati possui um clima do tipo Cfb, caracterizado como temperado, com verões suaves e invernos marcados por geadas fortes e frequentes. As temperaturas médias variam, registrando uma máxima média de 24,2 °C e uma mínima média de 11,0 °C. A amplitude térmica média é notável, sendo janeiro o mês mais quente e julho o mais frio. Janeiro se destaca como o mês mais chuvoso, enquanto agosto é o mais seco, não apresentando uma estação seca definida. As médias mensais de precipitação e de umidade relativa do ar são de 194 mm e de 79,6%, respectivamente (DE ANDRADE *et al.*, 2010).

4.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições, em esquema fatorial 2×7, sendo dois tratamentos de inoculação micorrízica e sete tratamentos de doses de fósforo (P) no substrato (solo). Dessa forma, o experimento teve 14 tratamentos, perfazendo 56 unidades experimentais (14 tratamentos × 4 repetições). Cada unidade experimental foi composta por 3 vasos, totalizando 168 vasos, cultivando-se uma planta de erva-mate por vaso.

Os sete tratamentos de doses de P fornecidos no solo para o cultivo das plantas de erva-mate foram 0; 5; 15; 30; 60; 150; e 400 mg kg⁻¹ (miligramas de P por quilograma de solo).

Os dois tratamentos de inoculação micorrízica foram: 1) sem e 2) com inoculação das plantas com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). O inoculante de FMAs foi fornecido na cova no momento do plantio. O inoculante usado neste estudo foi fornecido pela CRB-JD/Embrapa Agrobiologia, composto por uma mistura de esporos de 11 diferentes linhagens de FMAs (Tabela 1).

Tabela 1. Espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) presentes na composição do inoculante que foi usado para inocular as plantas no momento do plantio (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Vaso	Código da Linhagem	Código original da Linhagem	Espécie	Nº de esporos por dose (quantidade fornecida/planta)
1594	A92	CNPAB 048	<i>Acaulospora foveata</i> Trappe & Janos (1982)	20
2005	A38	IES-33	<i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe (1977)	20
2015	A44	Inóculo 51	<i>Entrophospora etunicata</i> (W.N.Becher & Gerd.) Błaszk., B.T. Goto, Magurno, Niezgodna & Cabello (2022)	20
2008	A2	CNPAB 002	<i>Dentiscutata heterogama</i> (T.H. Nicolson & Gerd) Sieverd, F.A Souza & Oehl (2008)	20
2010	A36	IES-29	<i>Gigaspora candida</i> Bhattacharjee, Mukerji, J.P. Tewari & Skoropad (1982)	20
1983	A43	IES-42	<i>Gigaspora margarita</i> W.N. Becker & I.R.Hall (1976)	20
1588	A20	CNPAB 020	<i>Glomus Formosanum</i> C.G. Wu & Z.C. Chen (1986)	20
2350	A5	CNPAB 005	<i>Rhizophagus clarus</i> (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) C. Walker & Schuessler (2010)	20
1600	A80	CNPAB 038	<i>Scutellospora calospora</i> (T. H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & F.E. Sanders (1986)	20
1592	A70	CNPAB 029	<i>Cetranspora pellucida</i> (T.H. Nicolson & N. C. Schenck) Oehl, F.A. Souza & Sieverd. (2009) [2008]	20

4.3. Instalação e condução do experimento

Previamente à instalação do experimento de casa de vegetação, realizou-se a análise do solo usado como substrato no cultivo da erva-mate (Tabela 2). Observou-se que o solo utilizado no experimento (coletado em uma área de Latossolo Vermelho Distrófico) apresentou textura muito argilosa (teor de argila > 60 g kg⁻¹) e, em condições naturais, continha 1,0 mg dm⁻³ de P-disponível (P Mehlich-1), classificado como muito baixo, enquanto o teor de K-disponível foi classificado como médio, de acordo com o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SBCS, 2019).

Tabela 2. Resultados da análise granulométrica e química do solo utilizado como substrato para o cultivo das plantas de erva-mate (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC (pH 7)
---CaCl ₂ ---	-----cmol _c dm ⁻³ -----					
4,0	0,21	1,20	1,80	6,87	15,85	19,06
P Mehlich-1	V%	MO	Areia	Silte	argila	
--mg dm ⁻³ --	---%---	--g dm ⁻³ --	-----g kg ⁻¹ -----			
1,00	16,84	28,10	57	303	640	

Fonte: Laboratório de Solos Florestais da UNICENTRO, *Campus* de Irati.

As mudas de erva-mate (variedade Ybaporanga) foram obtidas por propagação seminal. Quando as mudas se apresentaram com altura aproximada de 25 cm, estando aptas a serem plantadas em campo, realizou-se o transplante para os vasos de PVC contendo 10 kg de substrato (solo), iniciando-se assim o período experimental. Dessa forma, cada planta de erva-mate foi cultivada em um vaso contendo 10 kg de solo.

As adubações NPK de plantio e cobertura foram feitas através de aplicações de soluções nutritivas. A adubação fosfatada (cuja dose variou de acordo com os tratamentos de doses de P) foi fornecida totalmente durante o plantio das mudas nos vasos, de forma localizada na cova. As soluções nutritivas da adubação de plantio (cada solução contendo um tratamento específico de dose de P) foram feitas usando o fosfato monoamônico (MAP) e ureia (ambas fontes p.a.). Neste caso, a ureia foi inserida para corrigir a dose de nitrogênio (N), de tal forma a fornecer, para todos os vasos, 71 mg kg⁻¹ de N na adubação de plantio. Não foi aplicado potássio (K) na adubação de plantio, devido ao teor deste nutriente no solo natural ser classificado como médio (Tabela 2).

Além da adubação de plantio, foram também realizadas adubações de cobertura com N e K, que foram feitas de forma idêntica para todos os vasos do experimento, aplicando-se o total de 120 e 80 mg kg⁻¹ de N e K em cobertura, respectivamente, divididas em quatro aplicações, realizadas a cada dois meses. Para o preparo das soluções nutritivas aplicadas em cobertura foram usadas as fontes ureia e nitrato de potássio (ambas fontes p.a.).

Durante o período experimental, realizou-se o monitoramento diário da irrigação e o controle periódico de algas e plantas invasoras que porventura surgiram na superfície do solo. Houve monitoramento quanto à incidência de pragas e doenças, contudo, não foi necessário implementar nenhum controle. A figura 2 exibe imagens de diferentes fases do experimento.



Figura 2. Imagens feitas do experimento em diferentes fases: instalação, condução, avaliação de crescimento e colheita das plantas de erva-mate. (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

4.4. Avaliações realizadas

As avaliações de crescimento da erva-mate foram conduzidas por meio da mensuração de diâmetro de caule, utilizando um paquímetro digital, e da altura da parte aérea, com o auxílio de uma régua graduada, a partir do ponto de contato do caule da planta com o substrato. Essas medições foram realizadas em três momentos distintos, aos 90, 210 e 320 dias após o transplântio (DAT).

Aos 320 DAT (no final do 10º mês após o transplântio das mudas de erva-mate para os vasos e aplicação dos tratamentos de inoculação micorrízica e doses de P), as plantas foram colhidas e separadas em raízes, caule (no caso caule + ramos) e folhas. As raízes foram obtidas por meio de peneiramento do substrato sob lavagem em água corrente. Em sequência, essas seções (raízes, caule e folhas) foram pesadas usando uma balança digital para determinar seus pesos úmidos correspondentes.

No Laboratório de Solos Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da UNICENTRO, os materiais de folhas, caule e raízes de cada planta foram secos em estufa com circulação forçada de ar a 58-60° C até atingirem peso constante para determinação dos pesos de matéria seca das respectivas

amostras. Logo após, os materiais vegetais foram moídos em moinho do tipo Wiley.

Posteriormente foi realizada a determinação do teor de P em amostras de material vegetal seco e moído de raízes, caule e folhas, conforme metodologia descrita em Embrapa (2009), cujos resultados foram expressos em g kg^{-1} (gramas de P por quilograma de matéria seca). Relacionando-se os valores de teores de P do tecido vegetal das diferentes partes da planta com os respectivos valores de pesos secos, obteve-se a estimativa da quantidade de P acumulada em cada parte da planta (raízes, caule e folhas), expressa em mg planta^{-1} (miligramas de P por planta).

4.5. Análise de dados

Cada valor atribuído a uma variável específica foi consistentemente calculado a partir da média de três plantas, levando em conta que em cada unidade experimental (composta por três vasos com uma planta cada) foram cultivadas três plantas.

A normalidade e homoscedasticidade dos dados obtidos foram testadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, usando o *software* R versão 3.5.1. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), considerando o delineamento em blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições, em esquema fatorial 2×7 (dois tratamentos de inoculação micorrízica e sete tratamentos de doses de P), com auxílio do *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

Quando significativo pela ANOVA, as médias foram comparadas pelo teste de Scott Knott ($p \leq 0,05$) (SCOTT; KNOTT, 1974). No caso de significância para o fator “doses de P”, procedeu-se também o ajuste de modelos de regressão polinomial de primeira e segunda ordem, que foram considerados para a apresentação dos resultados das variáveis de teor e acúmulo de P.

5. RESULTADOS

5.1. Crescimento inicial

Na primeira avaliação (90 DAT), tanto a altura de parte aérea quanto o diâmetro de coleto foram afetados de forma significativa ($p \leq 0,05$) pelos fatores estudados (“inoculação micorrízica” e “doses de P”), de forma isolada e pela interação entre os fatores. Porém, na segunda avaliação (210 DAT), as variáveis de crescimento tiveram comportamento distinto. A altura foi significativamente afetada pelos efeitos dos fatores, de forma isolada e pela interação entre eles, mas não houve variação significativa de diâmetro ($p \geq 0,05$). Já na terceira avaliação (320 DAT), tanto a altura quanto o diâmetro foram significativamente afetados de forma isolada pelo fator “doses de P”, enquanto o fator “inoculação micorrízica” influenciou de forma significativa apenas a altura de parte aérea, não sendo observado diferença significativa para o diâmetro de coleto (Tabela 3).

Tabela 3. Quadrados médios da análise de variância para altura de parte aérea e diâmetro de coleto em plantas de erva-mate avaliadas aos 90, 210 e 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Fontes de Variação	GL	Quadrados médios – Altura de planta		
		90 DAT	210 DAT	320 DAT
Bloco	3	20,0625 n.s.	141,5549 **	297,0644 ***
Inoculação Micorrízica (M)	1	277,8583 **	256,5004 **	570,1998 ***
Fósforo (P)	6	193,7500 ***	339,7145 ***	1268,9825 ***
M×P	6	82,2697 **	99,7208 **	78,0906 n.s.
Resíduo	39	21,7912	30,8637	38,7872
CV (%)		10,89	8,33	6,79
Média		42,86	66,72	91,70

Fontes de Variação	GL	Quadrados médios – Diâmetro de coleto		
		90 DAT	210 DAT	320 DAT
Bloco	3	0,7243 *	2,2638 n.s.	9,5878 **
Inoculação Micorrízica (M)	1	1,5016 **	0,7921 n.s.	5,4332 n.s.
Fósforo (P)	6	0,5917 **	2,9496 n.s.	31,7945 ***
M×P	6	0,8782 ***	3,7737 n.s.	1,4611 n.s.
Resíduo	39	0,1999	1,7189	1,7611
CV (%)		8,39	13,32	8,93
Média		5,33	9,84	14,86

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente (teste de F).

Os dados obtidos de altura de parte aérea e diâmetro de coleto estão apresentados nas figuras 3 e 4, respectivamente.

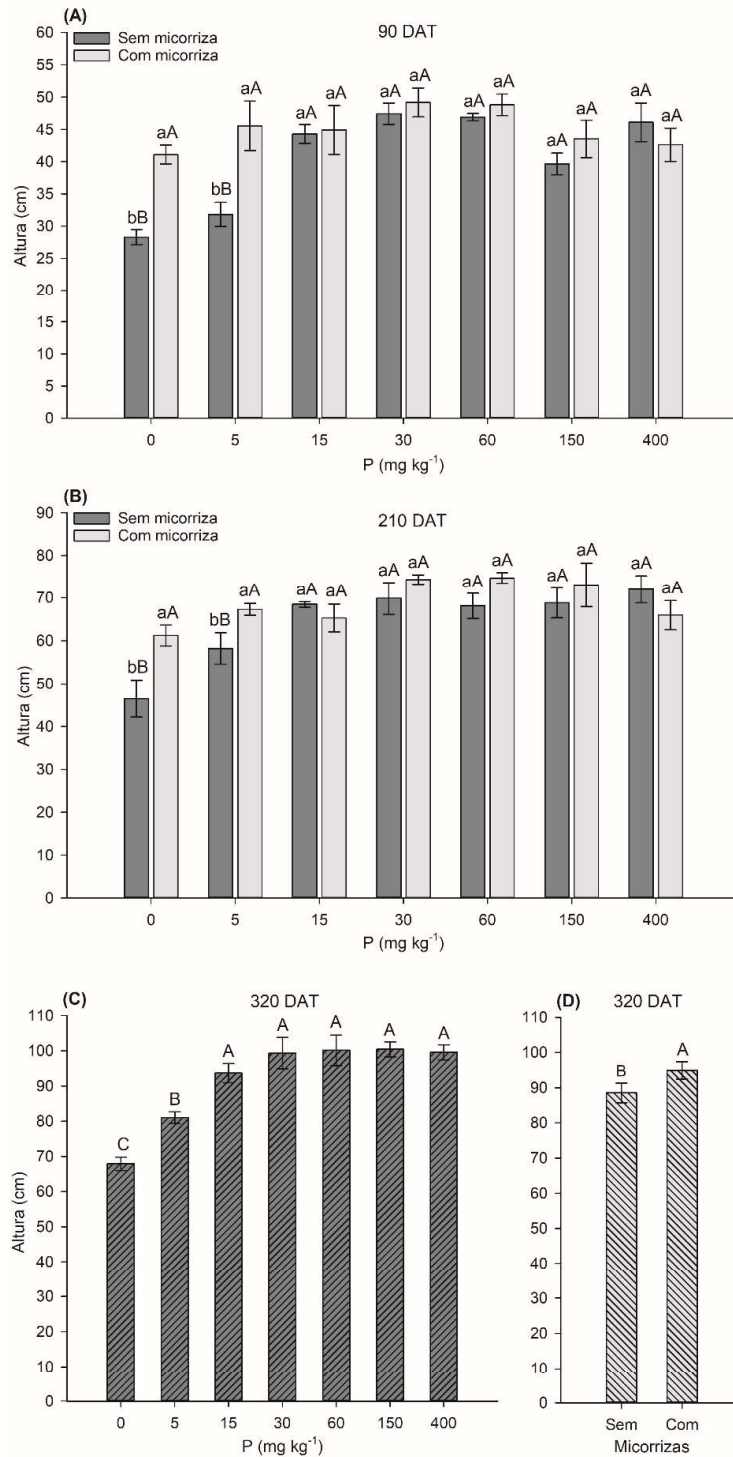


Figura 3. Altura de parte aérea (em centímetros) em plantas de erva-mate avaliadas aos 90 (A), 210 (B) e 320 (C e D) dias após o transplante (DAT), em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Figuras A e B: médias seguidas da mesma letra, minúscula comparando os tratamentos de inoculação micorrízica e maiúscula comparando as doses de P, não diferem entre si (Scott Knott, $p \leq 0,05$).

Figuras C e D: médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott Knott, $p \leq 0,05$). Barras denotam o erro padrão da média.

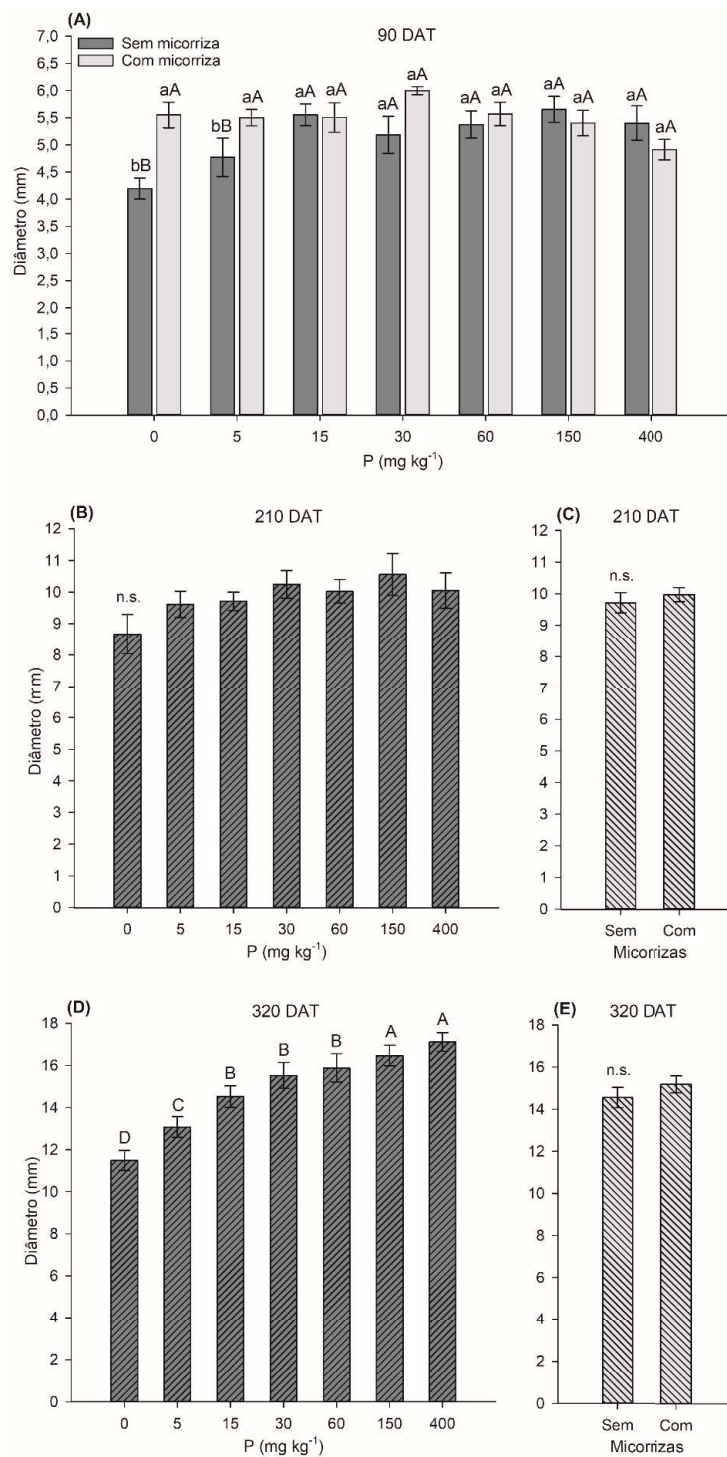


Figura 4. Diâmetro de coleto (em milímetros) em plantas de erva-mate avaliadas aos 90 (A), 210 (B e C) e 320 (D e E) dias após o transplante (DAT), em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Figura A: médias seguidas da mesma letra, minúscula comparando os tratamentos de inoculação micorrízica e maiúscula comparando as doses de P, não diferem entre si (Scott Knott, $p \leq 0,05$). Figuras B, C e E: n.s., não significativo pelo teste de F ao nível de 5% de probabilidade de erro. Figura D: médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott Knott, $p \leq 0,05$). Barras denotam o erro padrão da média.

Considerando a interação entre os fatores, aos 90 e 210 DAT, nos tratamentos sem inoculação com micorrizas houve menor altura de parte aérea nas duas menores doses de P, dose zero (altura média = 28 e 46 cm para 90 e 210 DAT, respectivamente) e 5 mg kg⁻¹ (altura média = 31 e 58 cm para 90 e 210 DAT, respectivamente). A partir da dose 15 mg kg⁻¹ de P não houve mais variação significativa de altura, apresentando valor médio de 45 e 70 cm nas avaliações de 90 e 210 DAT, respectivamente. Por outro lado, nos tratamentos com inoculação micorrízica houve acréscimo significativo de altura de parte aérea nas duas menores doses de P (0 e 5 mg kg⁻¹), resultando em não diferença significativa entre as sete doses de P aplicadas no solo, com a altura sendo em média 45 e 69 cm para 90 e 210 DAT, respectivamente. Neste sentido, a inoculação dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) resultou em aumentos significativos de altura na magnitude de 45 e 43% aos 90 DAT nas doses 0 e 5 mg kg⁻¹, respectivamente, e de 32 e 16% aos 210 DAT nas doses 0 e 5 mg kg⁻¹, respectivamente. A partir da dose 15 mg kg⁻¹ de P não houve mais efeito significativo da inoculação micorrízica sobre a altura de parte aérea da erva-mate avaliada aos 90 e 210 DAT (Figuras 3A e 3B).

Nas avaliações realizadas aos 320 DAT, as doses 0 e 5 mg kg⁻¹ de P também apresentaram os menores valores de altura de parte aérea, com médias de 68 e 74 cm, respectivamente. A partir da dose 15 mg kg⁻¹ de P, os valores não alteraram mais de forma significativa e a média de altura entre os tratamentos 15, 30, 60, 150 e 400 mg kg⁻¹ de P foi 99 cm (Figura 3C). Nessa avaliação, as médias de altura obtidas entre tratamentos sem e com inoculação micorrízica foram 89 e 95 cm, respectivamente, representando um acréscimo significativo de 7% para os tratamentos com inoculação micorrízicas (Figura 3D).

Quanto ao diâmetro de coleto, aos 90 DAT essa variável também foi influenciada pela interação entre os fatores. Sem a inoculação as duas menores doses de P resultaram em menores valores de diâmetro (4,2 e 4,8 mm para as doses 0 e 5 mg kg⁻¹, respectivamente). A partir da dose 15 mg kg⁻¹ de P não houve mais variação significativa e o valor médio de diâmetro entre as doses 15, 30, 60, 150 e 400 mg kg⁻¹ de P foi 5,4 mm. Nos tratamentos com inoculação micorrízica não houve variação significativa de diâmetro de coleto entre as diferentes doses de P e o valor foi em média 5,5 mm. Neste sentido, os FMAs resultaram em aumentos de 32 e 15% para o diâmetro de coleto nas doses 0 e

5 mg kg⁻¹ aos 90 DAT, respectivamente, A partir da dose 15 mg kg⁻¹ não foi mais observado efeito significativo da inoculação micorrízica sobre o diâmetro de coleto da erva-mate avaliada aos 90 DAT (Figura 4A).

Aos 210 DAT não houve efeito significativo dos tratamentos de inoculação micorrízica e doses de P sobre o diâmetro de coleto. O valor médio de diâmetro encontrado nesta avaliação foi 9,8 mm (Figuras 4B e 4C).

Aos 320 DAT o diâmetro de coleto teve médias de 11,5 (dose zero), 12,2 (dose 5 mg kg⁻¹ P), 15,3 (média entre as doses 15, 30 e 60 mg kg⁻¹ P) e 16,8 (média entre as doses 150 e 400 mg kg⁻¹ P). Assim, o diâmetro de coleto foi a única variável de crescimento que teve resposta positiva sob aplicação de altas doses de P no solo (acima de 30 mg kg⁻¹ de P). A inoculação micorrízica não afetou significativamente o diâmetro de coleto na avaliação realizada aos 320 DAT (Figuras 4D e 4E).

5.2. Produção de matéria seca

Todas as variáveis analisadas para a produção de matéria seca foram significativamente afetadas pelos efeitos isolados dos fatores (“inoculação micorrízica” e “doses de P”, $p \leq 0,05$). Porém, nenhuma variável foi afetada significativamente pela interação entre os fatores (“ \times doses de P”, $p > 0,05$) (Tabela 4).

Tabela 4. Quadrados médios da análise de variância para pesos de matéria seca de folha (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Fontes de Variação	Quadrados médios para variáveis de produção de matéria seca					
	GL	MSF	MSC	MSPA	MSR	MST
Bloco	3	65.1205 ***	74.2004 ***	258.9714 ***	11.4051 n.s.	285.2820 ***
Inoculação Micorrízica (M)	1	186.1940 ***	36.5394 *	387.6831 ***	134.0630 ***	977.7105 ***
Fósforo (P)	6	175.0669 ***	152.0980 ***	637.9711 ***	230.0087 ***	1564.7814 ***
M \times P	6	13.7885 n.s.	7.1430 n.s.	36.9774 n.s.	14.1141 n.s.	79.1040 n.s.
Resíduo	39	6.0696	8.5232	21.6028	11.1263	44.4620
CV (%)		12.66	13.39	11.27	18.03	11.16
Média		19.46	21.80	41.26	18.50	59.76

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente (teste de F).

Os resultados de produção de matéria seca de folhas, caule, parte aérea (folhas + caule), raízes e total (parte aérea + raízes) e a relação percentual entre a matéria seca de raiz e parte aérea estão apresentados na figura 5.

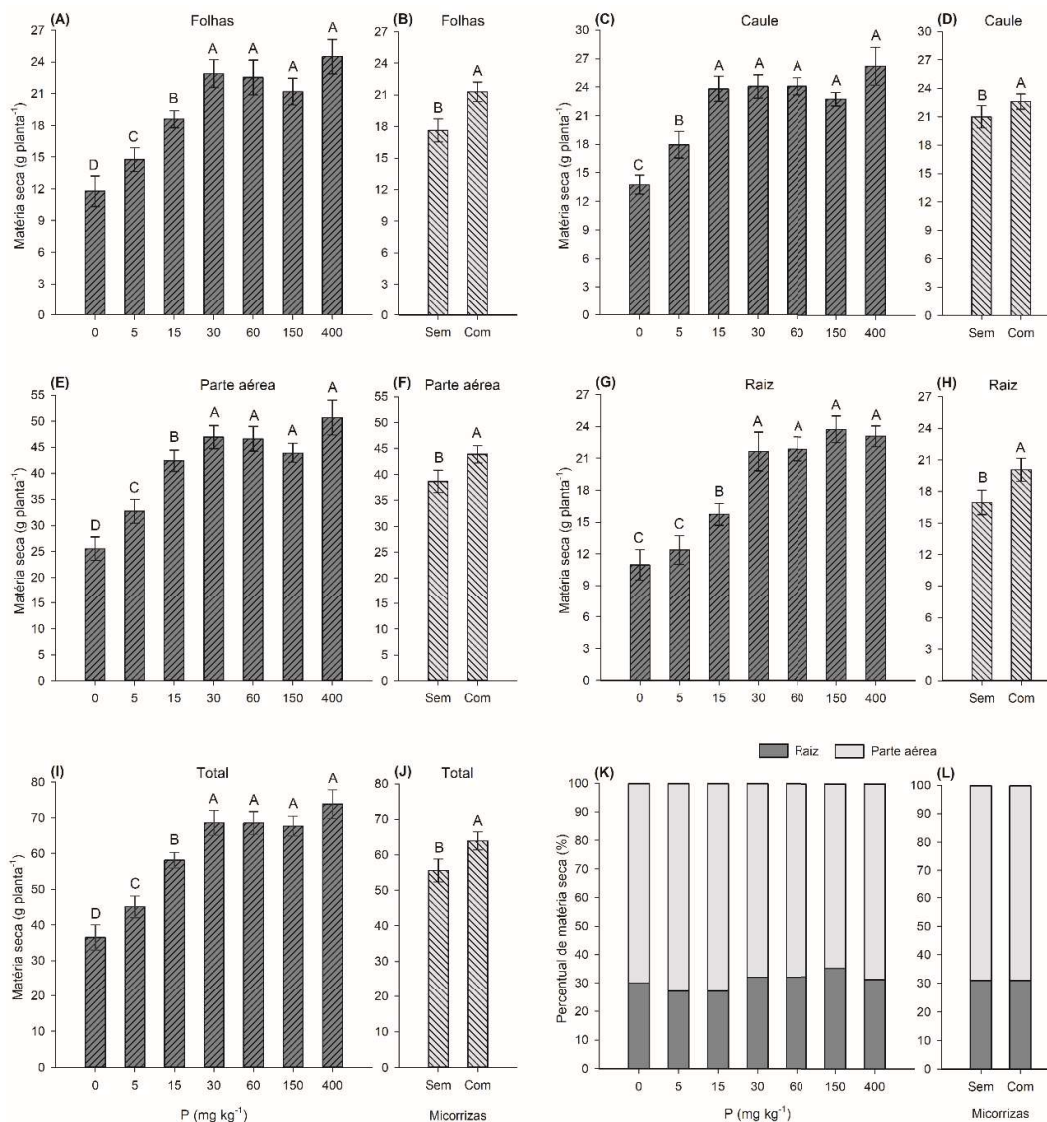


Figura 5. Produção de matéria seca (em gramas) de folhas (A e B), caule (C e D), parte aérea (E e F), raízes (G e H), total (I e J) e relação percentual entre a matéria seca de raiz e parte aérea (K e L), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplante, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (teste de Scott Knott, $p \leq 0,05$).

Barras denotam o erro padrão da média.

Para todas as variáveis de produção de matéria seca, as doses 0, 5 e 15 mg kg⁻¹ de P resultaram em menores valores, sendo que os melhores resultados foram obtidos a partir da dose 30 mg kg⁻¹ de P (exceto para a matéria seca de caule, o qual a dose 15 mg kg⁻¹ já proporcionou o melhor resultado). Assim, as doses 0, 5 e 15 mg kg⁻¹ de P e a média obtida entre as demais doses (30, 60, 150 e 400 mg kg⁻¹ de P) resultaram em, respectivamente, 12, 15, 19 e 23 g de matéria seca de folhas (Figura 5A); 14, 18, 24 e 24 g de matéria seca de caule (Figura 5C); 26, 33, 42 e 47 g de matéria seca de parte aérea (Figura 5E); 11, 12, 16 e 23 g de matéria seca de raízes (Figura 5G); e 36, 45, 58 e 70 g de matéria seca total (Figura 5I).

Todas as variáveis de produção de matéria seca tiveram seus valores incrementados com inoculação micorrízica. Os valores médios de matéria seca de folhas (Figura 5B), caule (Figura 5D), parte aérea (Figura 5F), raízes (Figura 5H) e total (Figura 5J) foram aumentados em 21, 8, 14, 18, e 15%, respectivamente, com a inoculação das plantas de erva-mate com os FMAs.

Do total de produção de biomassa por planta, a relação percentual entre a quantidade de matéria seca produzida de raiz e parte aérea (conhecida como “relação raiz/parte aérea”) foi em média 0,31, ou seja, 31% da biomassa total foi de raiz, enquanto 69% da biomassa total foi de parte aérea (caule + folhas). Destaca-se que esta relação não foi alterada em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (Figuras 5K e 5L).

5.3. Concentração de fósforo na matéria seca

O teor de P na matéria seca de folhas, caule e raízes foi significativamente afetado apenas pelo fator “doses de P” ($p \leq 0,05$), não sendo influenciado pelo fator “inoculação micorrízica” e nem pela interação entre os fatores ($p > 0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5. Quadrados médios da análise de variância para teor de fósforo na matéria seca de folha (P-folha), caule (P-caule) e raiz (P-raiz) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Fontes de Variação	Quadrados médios para variáveis de teor de fósforo (P) na matéria seca			
	GL	TP-folha	TP-caule	TP-raiz
Bloco	3	0,1183 ***	0,0181 n.s.	0,0429 *
Inoculação Micorrízica (M)	1	0,0141 n.s.	0,0011 n.s.	0,0027 n.s.
Fósforo (P)	6	0,0773 ***	0,3587 ***	0,2332 ***
M×P	6	0,0051 n.s.	0,0088 n.s.	0,0083 n.s.
Resíduo	39	0,0066	0,0192	0,0143
CV (%)		9,80	19,00	14,91
Média		0,83	0,73	0,80

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente (teste de F).

Os resultados obtidos de teor de P que foram determinados nos tecidos de matéria seca de folhas, caule e raízes estão apresentados na figura 6.

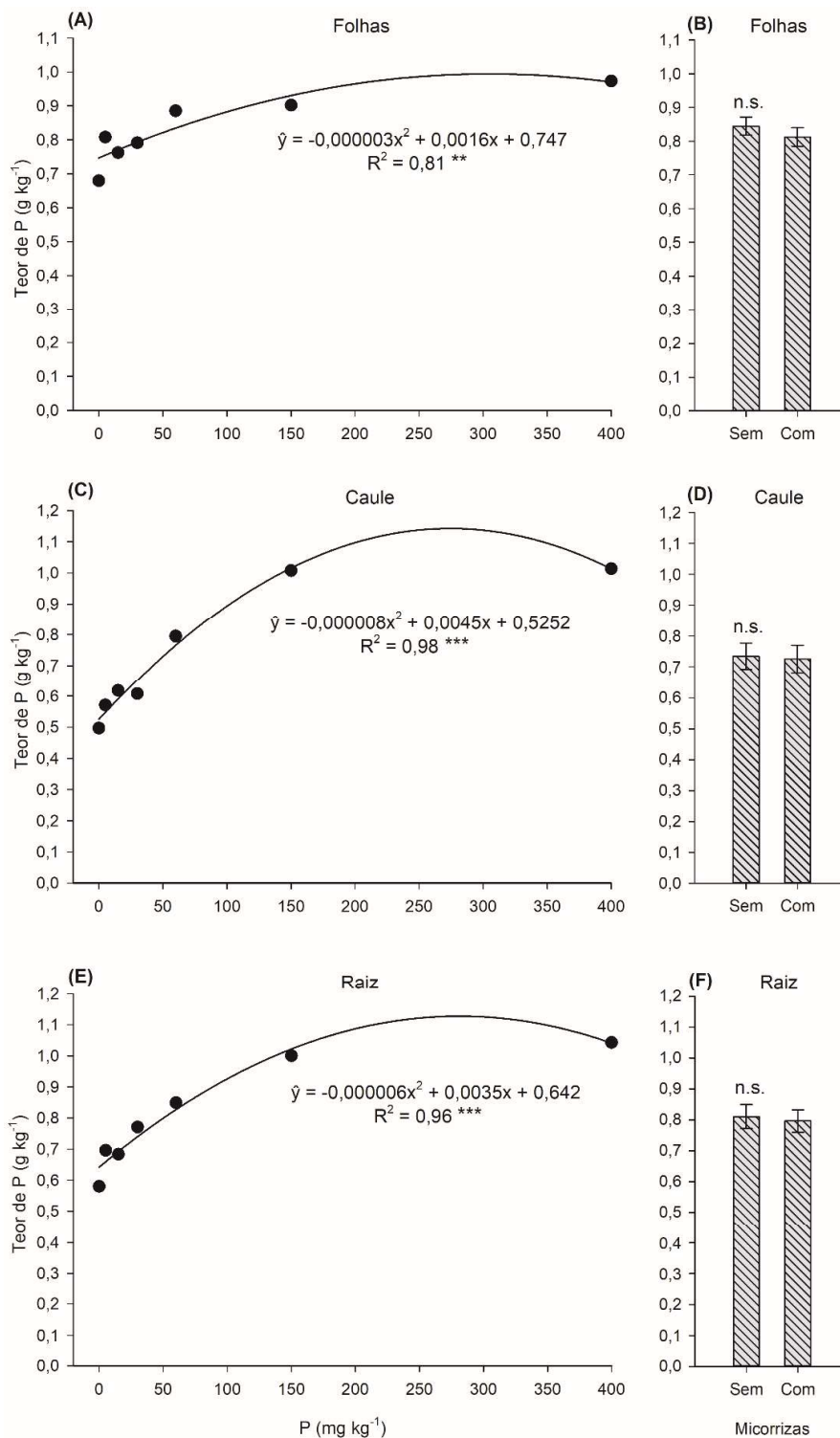


Figura 6. Teor de P (em g kg⁻¹) dos tecidos de matéria seca de folhas (A e B), caule (C e D) e raízes (E e F), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplante, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrizica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Figuras A, C e E: *** e **, significativo a 0,1% e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. Figuras B, D e F: n.s., não significativo pelo teste de F ao nível de 5% de probabilidade de erro e barras denotam o erro padrão da média.

Os valores de teor de P nos tecidos de folhas, caule e raízes incrementaram com o aumento das doses de P no solo. Entre as doses 0-400 mg kg⁻¹ de P, os valores de teor de P variaram entre 0,68-0,97, 0,50-1,01, e 0,58-1,04 g kg⁻¹ nos tecidos de folhas, caule e raízes, respectivamente.

Em função das sete doses de P, os valores de teor de P das plantas foram significativamente ($p \leq 0,01$) ajustados pela equação polinomial de segundo grau, apresentando-se coeficiente de determinação (R^2) de 81% para as folhas e acima de 95% para o caule e raízes. Assim, conforme as equações ajustadas, a taxa de incremento de teor de P nos tecidos das plantas foi maior sob menores doses de P e menor sob maiores doses de P no solo (Figuras 6A, 6C e 6E).

A inoculação micorrízica não afetou significativamente o teor de P dos tecidos de folhas, caule e raízes da erva-mate. De fato, a média de teor de P entre tratamentos sem e com inoculação micorrízica foram bem próximos (Figuras 6B, 6D e 6F).

5.4. Quantidade de fósforo acumulada na matéria seca

O acúmulo de P nas diferentes partes da planta foi significativamente afetado pelos efeitos isolados dos fatores (“micorriza” e “doses de P”, $p \leq 0,05$), mas, sem significância para a interação entre os fatores ($p > 0,05$) (Tabela 6).

Tabela 6. Quadrados médios da análise de variância para acúmulo de P na matéria seca de folha (AP-folha), caule (AP-caule), parte aérea (AP-PA), raiz (AP-raiz) e total (AP-total) em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 DAT, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Fontes de Variação	GL	Quadrados médios para variáveis de acúmulo de P				
		AP-folha	AP-caule	AP-PA	AP-raiz	AP-total
Bloco	3	1,4822 n.s.	18,3486 n.s.	18,0097 n.s.	4,8072 n.s.	33,7562 n.s.
Micorriza (M)	1	79,0495 ***	8,2675 n.s.	138,4366 *	43,3717 n.s.	336,8116 *
Fósforo (P)	6	226,3326 ***	379,1383 ***	1162,1140 ***	405,2710 ***	2893,0340 ***
M×P	6	9,4208 n.s.	6,7072 n.s.	27,0181 n.s.	14,5853 n.s.	71,2552 n.s.
Resíduo	39	4,7240	16,3834	26,0167	14,1543	57,9113
CV (%)		13,40	24,71	15,65	24,20	15,81
Média		16,22	16,38	32,60	15,54	48,15

¹ GL = Grau de Liberdade. ***, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente (teste de F).

Os resultados da quantidade acumulada de P nas folhas, caule, parte aérea (folhas + caule), raízes e total (parte aérea + raízes) e a relação percentual entre a quantidade de P acumulada na raiz e parte aérea estão na figura 7.

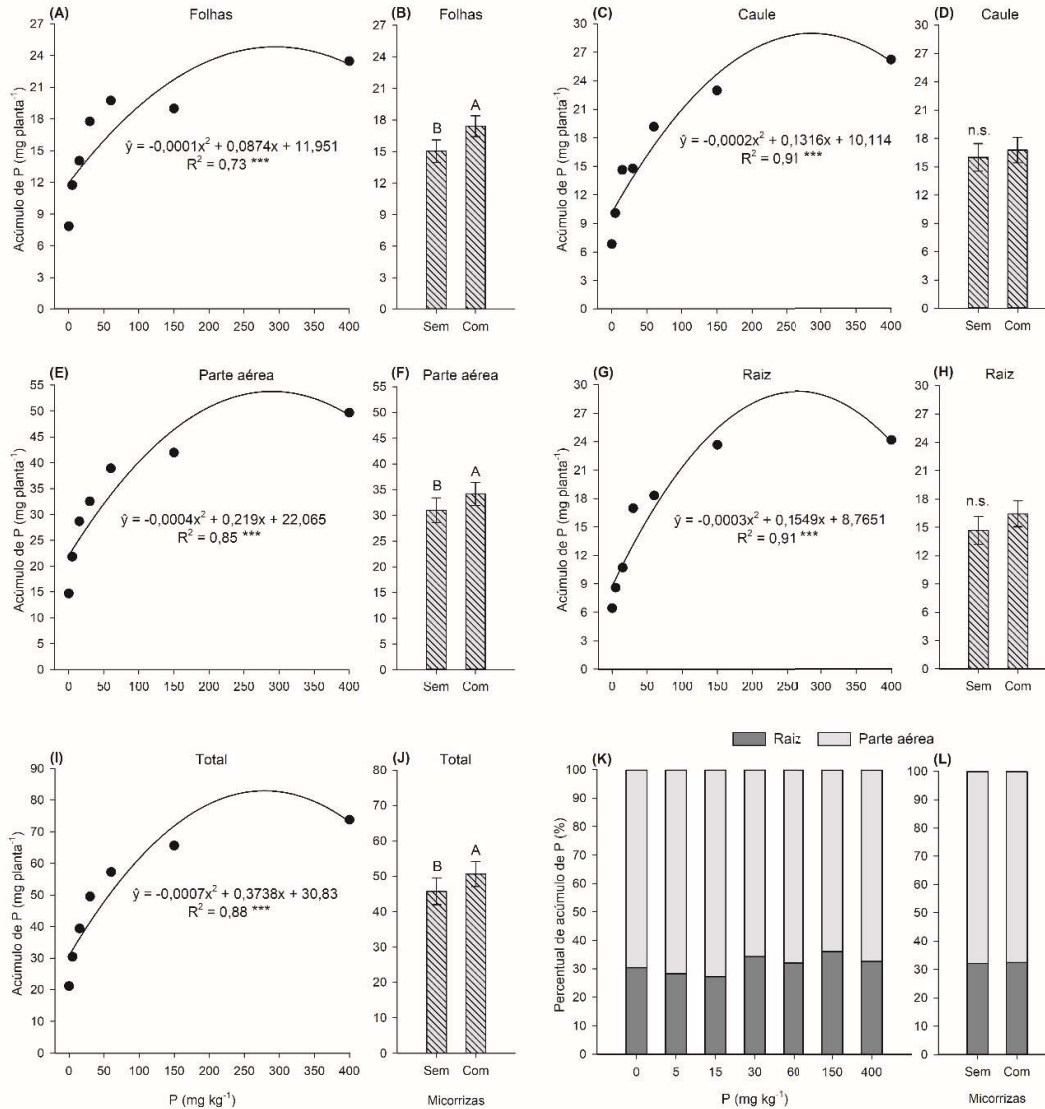


Figura 7. Acúmulo de P (em mg planta⁻¹) nas folhas (A e B), caule (C e D), parte aérea (E e F), raízes (G e H), total (I e J) e relação percentual de acúmulo de P entre raiz e parte aérea (K e L), em plantas de erva-mate avaliadas aos 320 dias após o transplante, em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (UNICENTRO, Irati-PR, 2023).

Figuras A, C, E, G e I: ***, significativo ao nível de 0,1% de probabilidade de erro.

Figuras B, F e J: Médias seguidas de diferente letra diferem entre si (Teste de F, $p \leq 0,05$) e barras denotam o erro padrão da média.

Figuras D e H: n.s., não significativo pelo teste de F ao nível de 5% de probabilidade de erro e barras denotam o erro padrão da média.

O acúmulo de P nas folhas, caule e raízes da erva-mate aumentaram conforme se procedeu o incremento das doses de P no solo. Entre as doses 0-400 mg kg⁻¹ de P, os valores de acúmulo de P variaram entre 8-23, 7-26, 15-50, 6-24 e 21-74 mg planta⁻¹ nas folhas, caule, parte aérea, raízes e total, respectivamente.

Assim como ocorreu para o teor de P dos tecidos, em função das doses de P no solo, os dados obtidos de acúmulo de P foram significativamente ($p \leq 0,001$) ajustados pela equação polinomial de segundo grau, obtendo-se coeficientes de determinação (R^2) de 73% para as folhas, 91% para o caule, 85% para a parte aérea, 91% para as raízes e 88% para o acúmulo total. Dessa forma, verificou-se que a taxa de acúmulo de P pela erva-mate por unidade de P fornecida ao solo foi maior sob menores doses de P e menor sob maiores doses de P (Figuras 7A, 7C, 7E, 7G e 7I).

A inoculação de FMAs aumentou o acúmulo de P nas folhas (Figura 7B) e, conseqüentemente, também houve incremento significativo no acúmulo de P da parte aérea (Figura 7F) e total (Figura 7J). Contudo, não houve efeito significativo da inoculação micorrízica sobre o acúmulo de P no caule (Figura 7D) e raízes (Figura 7H).

Considerando o acúmulo total de P, a relação entre a quantidade de P acumulada na raiz e parte aérea foi em média 0,32; ou seja, 32% do P total absorvido pela planta foi acumulado na raiz e 68% foi acumulado na parte aérea (caule + folhas), sendo que esta relação não foi alterada em função dos tratamentos de doses de P e inoculação micorrízica (Figuras 7K e 7L).

6. DISCUSSÃO

Os solos das regiões tropicais e subtropicais do globo são conhecidos pela baixa disponibilidade de fósforo (P) para a nutrição das plantas sob condições naturais, devido ao alto grau de interação do ânion fosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) com os coloides minerais do solo. Assim, o P é o nutriente que mais tem limitado a produção vegetal no Brasil (NOVAIS; SMYTH, 1999; HANYABUI *et al.*, 2020).

Neste sentido, o solo usado para a instalação do experimento, coletado em uma área de mata nativa (nunca fertilizado) da região, apresentou textura muito argilosa e extremamente deficiente em P, contendo apenas $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ (extrator Mehlich-1) do nutriente, conforme apresentado no laudo da análise química do solo (Tabela 2), sendo este valor classificado como muito baixo pelo atual Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná, Brasil (SBCS, 2019). Consequentemente, verificou-se que a aplicação de P no solo resultou em maior crescimento de erva-mate em altura de parte aérea, diâmetro de coleto e produção de matéria seca de raízes e parte aérea (folhas + caule). Os efeitos positivos da adubação fosfatada sobre o crescimento de erva-mate também foram demonstrados em outros estudos (SANTIN *et al.*, 2013; SANTIN *et al.*, 2017; ZAVISTANOVICZ *et al.*, 2017; BARBOSA *et al.*, 2018; CLEMENTE *et al.*, 2024).

Nessa pesquisa foram testadas sete doses de P, variando de 0 a 400 mg kg^{-1} (mg de P por quilograma de solo seco). Nesse caso, a erva-mate mostrou-se responsiva à adubação fosfatada quando cultivada em solo extremamente pobre em P, mas, em geral esta resposta foi estagnada a partir da dose 30 mg kg^{-1} de P (Figuras 3, 4 e 5). Assim, quanto ao desenvolvimento das plantas, o solo argiloso com severa deficiência em P prejudicou o crescimento inicial da erva-mate, mas, a aplicação de doses moderadas do nutriente já foi suficiente, sendo que elevadas doses não resultaram em melhor desenvolvimento das plantas, inferindo-se que a erva-mate é uma espécie que apresenta bom crescimento em solos com teores de P abaixo do adequado para a maioria das espécies cultivadas.

A dose 30 mg kg^{-1} de P representa a estimativa de 137 kg ha^{-1} de P_2O_5 , estando dentro dos padrões de doses de P recomendadas nas adubações fosfatadas de solos pobres em campo. Por outro lado, as condições edáficas do

solo em cultivos protegidos são diferentes das condições de campo, e essa dose (30 mg kg^{-1} de P) é considerada insuficiente para o cultivo de plantas em vasos com solo argiloso, mas como já supracitado, foi suficiente para o adequado desenvolvimento da erva-mate nesta pesquisa.

Ressalta-se que a erva-mate é uma espécie nativa dos solos ácidos e quimicamente pobres da região subtropical da América do Sul, o qual a espécie evoluiu sob condições de menor disponibilidade de P (CARVALHO, 2003). Em adição, o P foi fornecido em dose única na forma de solução nutritiva, aplicado sobre a superfície do solo e logo após o transplante das mudas, proporcionou às plantas o adequado acesso às respectivas doses de P desde o início do experimento, quando as raízes ainda eram pouco desenvolvidas. Ainda, nesta pesquisa foi usado vasos contendo 10 kg de solo, resultando na quantidade de $300 \text{ mg planta}^{-1}$ de P para o estabelecimento da dose 30 mg kg^{-1} . Assim, possivelmente houve boa capacidade tampão do solo para a manutenção da disponibilidade de P ao longo do período experimental em função dos tratamentos fornecidos (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O estudo do estado nutricional de P das plantas confirmou as respostas obtidas para as variáveis de crescimento. O teor de P, expresso em g kg^{-1} (gramas de P do tecido por quilograma de matéria seca), teve um bom ajuste de modelo de regressão polinomial de segunda ordem, em função das doses de P fornecidas ao solo (Figura 6).

Considerando o solo usado neste experimento severamente pobre em P sob condições naturais, o fornecimento de baixas doses de P até 30 mg kg^{-1} elevou o teor do nutriente nos tecidos das plantas deficientes, resultando em maior taxa de produção de matéria seca. Neste caso, o tratamento com 30 mg kg^{-1} de P resultou em valores médios de 0,79, 0,61 e 0,77 g kg^{-1} de P dos tecidos de raiz, caule e folha, respectivamente, podendo considerar estes valores como os tidos como adequados para a produção de matéria seca pela erva-mate em estágio inicial de crescimento pós-formação da muda. Destaca-se aqui que a análise de teor de P dos tecidos foram realizadas em todo o material de raízes, caule e folhas produzido pela planta. Portanto, os valores de teor de P obtidos neste estudo não devem ser comparados com os padrões nutricionais da literatura, onde geralmente são consideradas folhas específicas de determinada parte da planta (MARSCHNER, 2012; SBCS, 2019).

Para Santin *et al.* (2017), a adubação fosfatada eleva o teor de P total do tecido vegetal da erva-mate em todos os seus componentes, conforme seus testes realizados em condições de campo. Da mesma forma, Barbosa *et al.* (2018) relataram que em mudas de clones de erva-mate houve mudança na composição química das folhas com o fornecimento de P, apesar dos efeitos variarem conforme clones e características edáficas estudadas. O P participa de vários processos metabólicos na planta, como a transferência de energia, fazendo parte de compostos energéticos, estando ainda presente na síntese de nucleotídeos, sendo o ânion fosfato um componente integral do material genético (DNA/RNA), além de ter papel na síntese e estabilidade das membranas celulares (fosfolipídios de membranas) (TAIZ *et al.*, 2017).

A partir da dose 30 mg kg⁻¹ de P, o aumento das doses de P até 150 mg kg⁻¹ resultou em elevação do teor de P do tecido vegetal, mas não houve resposta das plantas em incremento de crescimento ou produção de biomassa, ocorrendo neste caso o denominado “consumo de luxo” (LAMBERS *et al.*, 2008; MARSCHNER, 2012). Por outro lado, de acordo com Larcher (2001), uma vez que as necessidades das plantas estejam atendidas, o incremento nos teores de nutrientes no tecido vegetal, dentro de limites, pode proporcionar outros benefícios, como a maior resistência à patógenos ou condições climáticas adversas. Contudo, teores de nutrientes do tecido vegetal muito acima do adequado pode também resultar em toxidez, ou seja, decréscimo da produção de biomassa ou qualidade do produto comercial (CECONI *et al.*, 2007; LAMBERS *et al.*, 2008; MARSCHNER, 2012).

O acúmulo de P, expresso em mg planta⁻¹ (miligramas de P por planta), é uma variável que relaciona o teor de nutriente do tecido com a matéria seca produzida, estimando a quantidade de P que foi absorvida pelas raízes e acumulada nas diferentes partes da planta. Neste trabalho, o acúmulo de P nas raízes, caule e folhas teve bom ajuste de modelo de regressão polinomial de segunda ordem, em função das doses de P fornecidas ao solo (Figura 7), parecido a aquele comportamento observado para o teor de P do tecido vegetal, mas também tendo forte correlação com o incremento de matéria seca. Ou seja, a elevação na produção de biomassa pela erva-mate exigiu maior aquisição de P do solo. Entre as doses 0 e 30 mg kg⁻¹ de P (variação de 30 unidades), a quantidade de P absorvida do solo pela erva-mate (estimada pelo acúmulo total

de P, Figura 7I) variou, em média, de 21 para 49 miligramas (acréscimo de 2,3 vezes).

Entretanto, quando a necessidade de P da planta para produção de matéria seca foi atendida (neste trabalho ocorreu na dose 30 mg kg⁻¹ de P), a adição de maiores doses de P no solo também elevou a quantidade de P absorvida pelas plantas, mas em magnitude bem menor. Ou seja, entre as doses 30 e 400 mg kg⁻¹ de P (variação de 370 unidades), a quantidade de P absorvida variou, em média, de 49 para 74 miligramas (acréscimo de 1,5 vezes). Assim, a adição de altas doses de P no solo diminuiu drasticamente a relação da quantidade de P absorvida pela erva-mate por unidade de nutriente fornecida ao solo. Este processo está relacionado com a capacidade de transporte do ânion fosfato através da membrana plasmática das células radiculares, cujo processo é rigorosamente controlado pelas enzimas conhecidas como transportadores de membrana (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MARSCHNER, 2012). Plantas deficientes em P ativam genes associados à expressão de mecanismos de adaptação à essa escassez. Dentre esses mecanismos, destaca-se a maior síntese de transportadores de membrana de alta afinidade para o ânion fosfato (ÁVILA *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2011).

Interessantemente, o incremento nas doses de P no solo aumentou a quantidade absorvida do nutriente pela erva-mate, como já relatado, mas a proporção de P acumulada nas diferentes partes da planta não foi alterada (Figura 7K). Assim, percebe-se que o P absorvido foi bem redistribuído entre as diferentes partes da erva-mate, mesmo sob condições de amplas faixas de doses do nutriente adicionadas ao solo.

Quanto a variável envolvendo a inoculação de FMAs, a interação entre a inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e as diferentes doses de P variaram conforme a época de avaliação e variável analisada.

Considerando a época de avaliação, os efeitos da inoculação micorrízica no crescimento inicial da erva-mate (mensurada pela altura de parte aérea e diâmetro de coleto) foram fortemente expressados na primeira avaliação (90 DAT), seguida pela segunda avaliação (210 DAT), e bem menos expressivo na terceira avaliação (320 DAT). Vilcatoma-Medina *et al.* (2018) também relataram a forte dependência da araucária [*Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze] aos FMAs em estádios iniciais de desenvolvimento da árvore, espécie esta que a

erva-mate acompanha em sua distribuição geográfica, dominante na Floresta Ombrófila Mista da região Sul do Brasil.

Ainda, destaca-se que nas duas primeiras avaliações (90 e 210 DAT), os benefícios da inoculação micorrízica ocorreram sob deficiência severa de P no solo (doses 0 e 5 mg kg⁻¹), sendo fortemente manifestada na altura de parte aérea e menos expressiva no diâmetro de coleto (Figuras 3 e 4). Assim, no início do período experimental, quando as plantas ainda apresentavam menor desenvolvimento radicular, os FMAs melhoraram a capacidade da erva-mate em absorver o P do solo deficiente no nutriente. O fato de os FMAs expressarem maior eficiência sob deficiência de P foi também recentemente relatado para outras espécies florestais e não florestais, como *Calophyllum brasiliense* Cambess (Silva *et al.*, 2018), *Coffea arábica* L. (Moreira *et al.*, 2019), *Plathymenia reticulata* Benth. (Prates *et al.*; 2021) e *Vigna unguiculata* (L.) Walp. (Diniz *et al.*, 2022).

Apesar de não totalmente compreendido, sabe-se que a disponibilidade de P tem influência direta na colonização dos FMAs em seu sistema radicular, sendo considerado por Antonioli e Kaminski (1991) o mecanismo de resposta mais evidente sobre o efeito da relação entre os organismos (SOLAIMAN, *et al.*, 2019). De acordo com Mustafa *et al.* (2016), a deficiência de P na planta reduz a síntese de fosfolipídeos, tornando as membranas celulares dos possíveis hospedeiros mais permeáveis, resultando em maior liberação de aminoácidos e outros compostos pelas raízes que são importantes para o desenvolvimento da comunidade de FMAs no solo.

Por outro lado, Rheinheimer (1991) já alertava para o menor desenvolvimento de FMAs sob altos níveis de P, sendo prejudicial ao crescimento das suas hifas externas, dificultando o estabelecimento da associação micorrízica. Ainda, Ramos e Martins (2010) citaram que, sob alta disponibilidade de P, a associação entre os organismos pode ser negativamente afetada, na qual o custo do consumo de carboidratos pelo fungo se tornar aspecto negativo para a planta, uma vez que esta não esteja necessitando do P fornecido pelo fungo. Desta forma, a planta passaria a utilizar mecanismos para diminuir o desenvolvimento da associação micorrízica, reduzindo, por exemplo, a atividade das enzimas fosfatases (CARDOSO *et al.*, 2010).

Como foi mencionado, aos 320 DAT a magnitude dos efeitos da inoculação micorrízica sobre o crescimento da erva-mate foi menor, porém ainda foi significativa para a altura de parte aérea (incremento de 7%). Além disso, todas as variáveis de produção de matéria seca determinadas aos 320 DAT foram incrementadas pelos FMAs. Neste caso, destaca-se que os benefícios da inoculação foram mais expressivos na produção de biomassa de folhas (incremento de 21%) e raízes (incremento de 18%) e menos expressivos na produção de biomassa de caule (incremento de 8%) (Figura 5), confirmando o comportamento observado (já comentado) quanto ao maior efeito da inoculação sobre o crescimento em altura de parte aérea em detrimento ao crescimento de diâmetro de coleto. Em experimento realizado em casa de vegetação com mudas de erva-mate, Tomazelli *et al.* (2022) também relataram que a produção de matéria seca das plantas foi bem maior com a inoculação de FMAs, em especial com a espécie *Rhizophagus clarus*. Entretanto, as pesquisas envolvendo inoculação micorrízica e erva-mate ainda são incipientes, mas, são amplas para outras espécies. Um estudo realizado com *Araucaria araucana* (Mol.) Koch mostrou que o cultivo de mudas inoculadas com espécies nativas de FMAs aumentou a produção de matéria fresca e seca de raízes e parte aérea (GODOY *et al.*, 2023).

Aos 320 DAT a inoculação de FMAs afetou as variáveis de forma isolada, sem interação com as doses de P fornecidas ao solo. Como resultado, o teor de P da matéria seca não foi significativamente afetado pela inoculação. Por outro lado, os FMAs introduzidos proporcionaram maior acúmulo de P nas folhas, como consequência do maior estímulo à produção de biomassa foliar (Figuras 6 e 7). Fonseca *et al.* (2019) observaram que a inoculação com FMAs estimulou o crescimento inicial de mudas de café (*Coffea arabica* L.), bem como o acúmulo de P nos tecidos dessas plantas. A interação micorrízica também foi benéfica com *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit em solo contaminado por Mn, incrementando a massa seca de parte aérea e de raiz, o número de folhas e comprimento de raízes e, principalmente, suprimindo os níveis tóxicos de Mn (CARMO *et al.*, 2022). Outros resultados positivos da inoculação micorrízica também foram descritos para café (*Coffea arabica* L.), Baru (*Dipterix alata* Vogel) e cacau (*Theobroma cacao* L.) (CHIALVA *et al.*, 2023; GHOMSI *et al.*, 2023; PADJUNG *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2023).

A colonização pelos FMAs resulta em alterações nas características morfológicas das plantas, uma vez que as hifas são estruturas longas e finas, podendo explorar grande volume de solo, muitas vezes inatingível por raízes, ora disponibilizando água e nutrientes ao hospedeiro, ora atuando como estruturas de reserva (BERBARA *et al.*, 2006; (BENNETT; GROTEN, 2022; MÜLLER *et al.*, 2017). Dessa forma, a associação micorrízica pode elevar a taxa fotossintética, influenciando positivamente os níveis de C total fixados (BENNETT; GROTEN, 2022. Ademais, propõe-se que exista relação entre FMAs e a tolerância das plantas quanto a estresses bióticos e abióticos, como por exemplo, períodos de seca (AUGÉ *et al.*, 2014).

Considerando as condições naturais de fertilidade dos solos do Paraná, um levantamento feito no estado mostrou que 90% das plantas avaliadas apresentavam algum grau de associação natural com FMAs (GAIAD; LOPES, 1986). A taxa também é maior no inverno (67,2%) do que no verão (42%), quando a planta visa otimizar a absorção de P para suprir a demanda durante a estação de máxima atividade metabólica (VELÁZQUEZ *et al.*, 2020). Por fim, os FMAs melhoram a qualidade ambiental, interagindo direta ou indiretamente com as plantas. Assim, quando inoculados no solo elevam a fração P-lábil na solução (BEURA *et al.*, 2019).

Assim exposto, percebe-se que conforme a presente pesquisa, a inoculação dos isolados de FMAs avaliados apresentou potencial de uso em plantios de erva-mate na região Sul do Brasil, porém necessitando ainda de mais pesquisas para consolidação da tecnologia.

7. CONCLUSÕES

A adubação fosfatada elevou a altura de parte aérea, diâmetro de coleto e produção de matéria seca de raízes, caule e folhas da erva-mate cultivada em solo deficiente em fósforo (P).

O teor e acúmulo de P nas raízes, caule e folhas aumentaram conforme os incrementos das doses P no solo.

A inoculação micorrízica incrementou a altura de parte aérea, o diâmetro de coleto e a produção de matéria seca de raízes, caule e folhas e elevou o acúmulo de P na erva-mate.

8. REFERÊNCIAS

AGUDO, T. C. **Aspectos produtivos e econômicos da atividade ervateira na microrregião de Irati-PR**. 2020. 24 f. Monografia (Especialização) - Curso de Mba em Gestão Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J. MICORRIZAS. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 21, n. 3, p. 441-455, dez. 1991. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84781991000300013>.

ARAÚJO, A.P. & MACHADO, C.T.T. **Fósforo**. In: FERNANDES, M.S., ed. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.253-280.

AUGÉ, Robert M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. **Mycorrhiza**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 13-24, 16 maio 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00572-014-0585-4>.

AVILA, F. W.; FAQUIN, V.; ARAUJO, J. L.; MARQUES, D. J.; JÚNIOR, P. M. R.; DA SILVA LOBATO, A. K.; RAMOS, S. J.; BALIZA, D. P. Phosphite supply affects phosphorus nutrition and biochemical responses in maize plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 646-653, 2011.

BARBOSA, Julierme Z. *et al.* Plant growth, nutrients and potentially toxic elements in leaves of yerba mate clones in response to phosphorus in acid soils. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.L.], v. 90, n. 1, p. 557-571, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820160701>.

BENNETT, Alison E.; GROTEN, Karin. The Costs and Benefits of Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungal Interactions. **Annual Review of Plant Biology**, [S.L.], v. 73, n. 1, p. 649-672, 20 maio 2022. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>.

BERBARA, R. L. L. *et al.* Fungos Micorrízicos Arbusculares: muito além da nutrição. In: FERNANDES, Manlio Silvestre (ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 1-720.

BEURA, K. *et al.* Dissolution of dominant soil phosphorus fractions in phosphorus-responsive soils of Bihar, India: Effects of mycorrhiza and fertilizer levels. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 3, p. 287–294, 4 fev. 2019.

BRUNDRETT, Mark C. *et al.* Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. **New Phytologist**, [S.L.], v. 154, n. 2, p. 275-304, 30 abr. 2002. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00397.x>.

BRUXEL, Fernanda *et al.* Taxonomia, descrição e distribuição geográfica de *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. In: FERLA, Noeli Juarez *et al.* (org.). **A cultura da ervamate e os ácaros: situação atual e perspectivas**. Porto Alegre: Evangraf, 2018. p. 9-21.

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

CARMO, J. F. DO *et al.* Silicon application and mycorrhiza inoculation promoted *Leucaena leucocephala* growth in a soil highly contaminated by manganese. **Nativa**, v. 10, n. 3, p. 410–416, 2022.

CARNEIRO, R.F.V.; MARTINS, M.A.; ARAUJO, A.S.F.; NUNES, L.A.P. L. Inoculação micorrízica arbuscular e adubação fosfatada no cultivo de forrageiras consorciadas. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v.60, n.232, p.1191-1202, 2011.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, p. 455-466.

CATANI, R. A.; PELLEGRINO, D. Avaliação da capacidade de fixação de fósforo pelo solo. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, [S.L.], v. 17, p. 19-27, 1960. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0071-12761960000100003>.

CECONI, D. E. *et al.* Exigência nutricional de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.) à adubação fosfatada. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 25–32, 30 mar. 2007.

CEDERVA. Reunião do Grupo de Trabalho SIPAM Erva-mate em 19 de abril de 2021: características dos sistemas tradicionais e agroecológicos de produção de erva-mate. [S. l.: s. n.], 2021.

CHECHI, L. A.; SCHULTZ, G. Inovação, conhecimento e aprendizagem: um estudo sobre arranjos produtivos locais de erva-mate no sul do Brasil. **Mundo Agrário**, [S.L.], v. 20, n. 43, p. 1-19, 5 abr. 2019. Universidad Nacional de La Plata. <http://dx.doi.org/10.24215/15155994e108>.

CHIALVA, M. *et al.* The mycorrhizal root-shoot axis elicits *Coffea arabica* growth under low phosphate conditions - Chialva - 2023 - New Phytologist - Wiley Online Library. **New Phytologist**, p. 271–285, 2023.

CLARK, R.B.; ZETO, S. K. Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 23, p. 867-902, 2000.

CLEMENTE, Rodrigo Claudino *et al.* Doses and critical phosphorus level for yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) clones. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 1-3, 2024. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20210903>.

COLOZZI-FILHO, A.; NOGUEIRA, M.A. Micorrizas arbusculares em plantas tropicais: café, mandioca e cana-de-açúcar. In: SILVEIRA, A.P.D.; FREITAS, S.S. (Ed.) **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. IAC, Campinas-SP. p. 39-56, 2007.

COLOZZI-FILHO, A.; SIQUEIRA, J.O. Micorrizas vesículo-arbusculares em mudas de cafeeiro. I. Efeitos de *Gigaspora margarita* e adubação fosfatada no crescimento e nutrição. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p.199-205, 1986.

COSTA, J. P. V. da *et al.* Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 828-835, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662006000400007>.

CROGE, C. P.; CUQUEL, F. L.; PINTRO, P. T. M. Yerba mate: cultivation systems, processing and chemical composition. A review. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 78, n. 5, e20190259, 2021.

CRUZ, Marina. **Diagnóstico de mercado e análise da concentração da produção da erva-mate no Brasil**. 2021. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

CUBAS, R. **Restabelecimento de Araucária angustifolia e Ocotea porosa após sete décadas de exploração florestal**. 2015. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

DANIEL, O. **Erva-mate: sistema de produção e processamento industrial**. Universidade Federal da Grande Dourados, 2009.

DANIELS HETRICK, B. A. Isolation and Culture of VA Mycorrhizal Fungi. In: POWELL, C. L., BAGYARAJ, D. J. (ed.). **VA Mycorrhiza** Florida: CRC Press Inc. 1984.

DE ANDRADE, A. R.; ROSEGHINI, W. F. F.; DE ASSIS MENDONÇA, F. Análise do campo térmico da cidade de Irati/PR: primeiros experimentos para a definição do clima urbano. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.6, 57-78, 2010.

DINIZ, Patrícia Fabian de Araújo *et al.* Doses de fósforo e FMAs na cultura do feijão-caupi na Paraíba. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, nov. 2022. ISSN 2447-9187 doi: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id7126>

EDWIN, G.; REITZ, R. **Aquifoliáceas**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1967. 47 p

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Brazil: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Planta, 2006. 169p.

FERREIRA FILHO, J. C. **Cultura e preparo da erva-mate**. Rio de Janeiro, Serviço de Informação Agrícola, 1948. 53 p.

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system**. *Ciência e Agrotecnologia*, v.35, 1039-1042, 2011.

FONSECA, A. J. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungus on the initial growth and nutrition of *Coffea arabica* L. genotypes. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 43, p. e006919, 12 ago. 2019.

FORZZA, R. C. *et al.* **Síntese da diversidade brasileira. Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Tradução. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010.

FOWLER, J. A. P.; STURION, J. A. **Aspectos da formação do fruto e da semente na germinação da erva-mate**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. Comunicado Técnico, n. 45.

GAIAD, S.; LOPES, E. S. **Ocorrência de micorriza vesicular-arbuscular em erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.)**. Boletim de Pesquisa Florestal, Curitiba, n. 12, p. 21-29, 1986.

GATIBONI, L. gC. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GERHARDT, M. **História ambiental da erva-mate**. 2013. 290 f. Tese (Doutorado em História Cultural). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GHOMSI, P. G. T. *et al.* Propagation Host Affects the Mycorrhiza-Mediated Cd Toxicity Alleviation in Cocoa (*Theobroma cacao* L.) Seedlings and Restoration of Soil Aerobic Mesophyll Microflora. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 2694–2707, 1 jun. 2023.

GODOY, R. *et al.* Native arbuscular mycorrhizal fungi improved *Araucaria araucana* growth over commercial inoculum under greenhouse and field conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 12 out. 2023.

GOULART, I. C. G. dos R.; SANTIN, D.; BRASILEIRO, B. P. Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 1345–1367, 2022. DOI: 10.5902/1980509863661. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/63661>. Acesso em: 21 jul. 2023.

HANYABUI, E.; APORI, S. O.; FRIMPONG, K. A.; ATIAH, K.; ABINDAW, T.; ALI, M.; ASIAMAH, J. Y.; BYALEBEKA, J. Phosphorus sorption in tropical soils. **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, n. 4, p. 599-616, 2020. doi: <https://doi.org/10.3934/agrfood.2020.4.599>

HARPER, J. L.; JONES, M.; SACKVILLE-HAMILTON, N. R. The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. In: ATKINSON, D. (Ed.). **Plant root growth: an ecological perspective**. Oxford: Blackwell, 1991.

HENNIGAN, Tom. Toward An Understanding of Arbuscular Mycorrhizal Symbioses within a Creation Model of Ecology: implications for godly stewardship and sustainable agriculture. **Answers Research Journal** 2, Georgetown, n. 2, p. 21-27, mar. 2009.

HOFFMANN, L. V.; LUCENA, V. S. 2006. Para entender Micorrizas Arbusculares. **Embrapa Algodão-Documentos** (INFOTECA-E), 1ª ed. Campina Grande, PB.

JALONEN, R. *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*. **Agroforestry Systems**. n. 2, p. 319-330, abr. 2013. doi:10.1007/s10457-012-9553-1

JONES, D. L.; DENNIS, P. G.; OWEN, A. G.; VAN HEES, P. A. W. Organic acid behavior in soils-misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, v. 248, p. 31– 41, 2003.

JÚNIOR, P. C. F.; FOCKINK, G. D. Anatomia foliar de plantas jovens de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hill.) sob diferentes níveis de sombreamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.16, n.3, p.335-341, 2017

JUNKEIRA, A. A. *et al.* Evolução da extração vegetal de erva-mate no período de 2004 a 2015. In: I Semana de Aperfeiçoamento em Engenharia Florestal, 2017, Curitiba. **Anais[...]** Curitiba, 2017. p. 306-310

KRATZ, D.; PIRES P. P.; STUEPP, C. A.; WENDLING, I. Produção de mudas de erva-mate por miniestaquia em substratos renováveis. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 609-616, 2015. doi: 10.5380/ufv.v45i3.36531

LAMBAIS, M.R.; RIOSRUIZ, W.F.; ANDRADE, R.M. Antioxidant responses in bean (*Phaseolus vulgaris*) roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 160, p. 421-428, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00881.x>

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. 2nd ed. Chicago, IL, USA: Springer Science&Business Media, LLC, 2008.

LARCHER, W. **Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups**. 4th ed. Berlin/Heidelberg, Germany; New York, NY, USA: Springer, 2001.

LEHMANN, J. *et al.* Biochar effects on soil biota—a review. **Soil Biol. Biochem.** 1812–1836. 2011.

LINDMAN, C. A. M.; FERRI, M. G. A. **Vegetação no Rio Grande do Sul**. Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1974.

LOPES, A. S. Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo. Piracicaba. Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

MARINHESKI, V. A produção da erva mate (*Ilex paraguariensis*) no contexto da agricultura familiar no município de Cruz Machado-PR. **Revista Produção e Desenvolvimento**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-11, 30 abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.32358/rpd.2017.v3.207>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. In: Accessed 13 Apr. 2023.

MELLO, V. D. C. **Morfologia e germinação da semente de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill.)**. Tese mestrado – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 1980.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006.

MOREIRA, Samuel Dias *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus doses on coffee growth under a non-sterile soil. **Revista Caatinga**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 72-80, mar. 2019. FapUNIFESP (SciELO).

MORTON, J. B. Species and clones of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales , Zygomycetes): their role in macro-and microevolutionary processes. **Mycotaxon**, Ithaca, v. 37, p. 493-515, 1990.

MUKERJI, A. K. La importancia de los productos forestales no madereros (PFNM) y las estrategias para el desarrollo sostenible. In: CONGRESO FORESTAL MUNDIAL, 11, Antalya, Turquia, 1997, v. 3, tema 15. p. 217-227.

MÜLLER, A.; NGWENE, B.; PEITER, E.; GEORGE, E. Quantity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungal storage organs within dead roots. *Mycorrhiza*, v. 27, n. 3, p. 201-210, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0741-0>.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais** Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

NUSSAUME, L.; KANNO, S.; JAVOT, H.; MARIN, E.; POCHON, N.; AYADI, A.; NAKANISHI, T. M.; THIBAUD, M. C. Phosphate import in plants: focus on the PHT1 transporters. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, article 83, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00083>.

OLIVEIRA, J. E. de; ESSELIN, P. M. Uma breve história (indígena) da erva-mate na região da Platina: da província do Gairá ao antigo sul de Mato Grosso. Porto Alegre, **Espaço Ameríndio**, v. 9, n. 3, p. 278-318, 2015. Semestral.

OLIVEIRA, T. E. G. de. **Uma análise do mercado da erva-mate produzida no Brasil, 2000 - 2020**. 2022. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia e Desenvolvimento, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

PADJUNG, R. *et al.* Growth and development of *Theobroma cacao* seedlings as a response to different dosages of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 343, n. 1, p. 012017, 1 out. 2019.

PRATES, Paulo *et al.* Mycorrhizal inoculation and phosphorus fertilization show contrasts on native species of the Brazilian Atlantic Forest and Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 45, p. 1-16, 2021. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. <http://dx.doi.org/10.36783/18069657rbcS20210013>.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

RAMOS, A. C.; MARTINS, M. A. Fisiologia de micorrizas arbusculares. In: SIQUEIRA, J. O. *et al.* (Eds.). **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras, MG: UFLA, 2010. v. 1, cap. 5, p. 133–152.

RAUSCH, C.; BUCHER, M. Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. **Planta**, v. 216, n. 1, 23–37, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0921-3>

RAVEN, P. H.; EICHHORN, S. E.; EVERT, R. F. **Biologia Vegetal**. 8 ed. Guanabara Koogan. Rio de Janeiro. 2014.

REDECKER, D. *et al.* Specific PCR primers to identify arbuscular mycorrhizal fungi within colonized roots. **Mycorrhiza**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 73-80, 25 ago. 2000. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s005720000061>.

REISSMANN, C. B. *et al.* Bio-elementos em folhas e hastes de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hill) sobre Cambissolos na região de Mandirituba-Pr. **Revista Floresta**, v. 16, n.2., p. 49-54, 1983.

RHEINHEIMER, D. S.; SOMAVILLA, A.; OLIVEIRA, L. B.; TIECHER, T. **Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada** (1st ed.; Vol. 1). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2020.

SAIDELLES, A.P.F., *et al.* Análise de metais em amostras comerciais de erva-mate do Sul do Brasil. **Brazilian Journal of Food & Nutrition/Alimentos e Nutrição**, v. 21, n. 2, pp. 259-265, 2010.

SANTIN, D. *et al.* Adubação nitrogenada e intervalos de colheita na produtividade e nutrição da erva-mate e em frações de carbono e nitrogênio do solo. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 1199-1214, 30 set. 2019. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509810843>.

SANTIN, D. *et al.* Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 363-375, 28 jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.5902/198050989282>.

- SANTIN, D. *et al.* Harvest handling and phosphate nutrition in yerba-matte (*Ilex paraguariensis*) culture during production stage. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 783-797, 2017.
- SANTOS, A. J. *et al.* Produtos não madeireiros: conceituação, classificação, valoração e mercados. **Revista Floresta**, v. 33, n. 2, p. 215-224, 2003.
- SANTOS, H.G. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67p. (Embrapa Solos. Documentos, 130).
- SBCS - SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Estadual Paraná, 2019. 289 p.
- SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 447-453, 1998.
- SCOTT A. J.; KNOTT, M. Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v. 30, p. 507-512, 1974.
- SENTENAC, H. & GRIGNON, C. Effect of pH on Orthophosphate Uptake by Corn Roots. **Plant Physiology**, v.77, p.136-141, 1985.
- SILVA, E. N. *et al.* Fungos Micorrízicos Arbusculares e doses de Fósforo no Desenvolvimento de Mudanças de Guanandi. *Nativa*, Sinop, v. 6, n. 3, p. 246-251, mai./jun. 2018
- SIMON, L.; BOUSQUET, J.; LÉVESQUE, R. C.; LALONDE, M. Origin and diversification of endomycorrhizal fungi and coincidence with vascular land plants. **Nature**, v.363, p.67-69, 1993.
- SIQUEIRA, J. O., OLIVEIRA, E. Crescimento, absorção de nutrientes e colonização micorrizica de dois cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) na presença e ausência de calagem. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 10, p. 220-225, 1986.
- SMITH, F. W. The phosphate uptake mechanism. **Plant and Soil**, v. 245, p. 105-114, 2002.
- SOLAIMAN, Z. M. *et al.* Biochar phosphorus concentration dictates mycorrhizal colonisation, plant growth and soil phosphorus cycling. **Sci Rep** 9, 5062. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41671-7>
- SOUSA, V. A. de; DAROS, T. L.; STURION, J. A. Fenologia reprodutiva de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil). In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003. Nova Prata, RS. **Floresta**: função social: anais. Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2003.
- SOUZA, G. G. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi promote the growth of *Dipteryx alata* Vogel. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e275172, 30 out. 2023.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica Sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de Fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG III**. Nova Odessa: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 2012.

TAIZ, L., *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal** (6 ed., 858p). Porto Alegre, RS: Artmed, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; SANTARÉM, E. R. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 819 p.

TARAFDAR, J.C.; JUNGK, A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.3, p.199-204, 1987

TERUEL, D. A. *et al.* Alterações estruturais do sistema radicular de soja em resposta à disponibilidade de fósforo no solo. **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 58, n. 1, p. 55-60, mar. 2001. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162001000100010>.

TOMAZELLI, Daniela *et al.* Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Improves Growth and Photosynthesis of *Ilex paraguariensis* (St. Hil) Seedlings. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [S.L.], v. 65, n. 1, p. 1-11, 2022. FapUNIFESP (SciELO).

VASCONCELOS, M. J. V.; *et al.* Isolation of high-affinity phosphate transporters SbPT1 and SbPT2 in *Sorghum bicolor* and their characterization in contrasting genotypes. **Genetics and Molecular Research**, v. 20, n. 2, gmr18717, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4238/gmr18717>

VELÁZQUEZ, M. S, *et al.* Colonization dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in *Ilex paraguariensis* crops: Seasonality and influence of management practices. **Journal of King Saud University –Science**, 32(1): 183-188., 2020

VÊNIA, C. *et al.* Estudos sobre fungos micorrízicos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, 2006.

VILCATOMA-MEDINA, C., KASCHUK, G., ZANETTE, F. Colonization and Spore Richness of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in *Araucaria* Nursery Seedlings in Curitiba, Brazil. **International Journal of Agronomy**. vol. 2018, annual 2018.

VILELA, M. L. Reserva Ecológica de Macaé de Cima, Nova Friburgo, RJ: Aquifoliaceae. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 47., 1996, Nova Friburgo. **Resumos**. Rio de Janeiro: Sociedade Botânica do Brasil, 1996. p. 146.

WANG, D.; LV, S.; JIANG, P.; LI, Y. Roles, regulation, and agricultural application of plant phosphate transporters. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 817, 2017.

WENDLING, I.; BRONDANI, G. Vegetative rescue and cuttings propagation of *Araucaria angustifolia*. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 93-104, 2015.

WENDLING, I.; SANTIN, D. **Propagação e nutrição de erva mate**. Brasília DF: EMBRAPA, 2014.

WESTHEIMER, F. H. Why nature chose phosphates. **Science**, p. 1173-1178. 1987.

ZAMBOLIM, L.; SIQUEIRA, J. O. **Importância e Potencial das Associações Micorrízicas para a Agricultura**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1985, 36 p. Série Documentos, 26.

ZANON, A. **Produção de sementes de erva mate *Ilex paraguariensis* St. Hil.** Curitiba, EMBRAPA - CNPF, 1988. 7. p. (EMBRAPA- CNPF. Circular Técnica, 16).

ZAVISTANOVICZ, T. C. *et al.* Morphophysiological responses of *Ilex paraguariensis* seedlings to different substrates and fertilizations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 111–115, fev. 2017.