

O alumínio melhora o crescimento e a qualidade de mudas clonais de erva-mate (*Ilex paraguariensis*, Aquifoliaceae)

Aluminum improves the growth and quality of yerba mate (*Ilex paraguariensis*, Aquifoliaceae) clonal seedlings

El aluminio mejora el crecimiento y la calidad de las plántulas clonales de yerba mate (*Ilex paraguariensis*, Aquifoliaceae)

Recebido: 31/08/2020 | Revisado: 10/09/2020 | Aceito: 15/09/2020 | Publicado: 17/09/2020

Ana Carolina Ricardi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4941-7021>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: ana.carol.ricardi@gmail.com

Victória Koszalka

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2501-628X>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: vic.koszalka@gmail.com

Christian Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6032-9949>

Universidade de São Paulo, Brasi

E-mail: christian42lopes@gmail.com

Luciano Farinha Watzlawick

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9944-7408>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: farinha@unicentro.br

Tayna Jornada Ben

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7483-3505>

Golden Tree Reflorestadora, Brasil

E-mail: tj.ben@hotmail.com

Renan Caldas Umburanas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4112-3598>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: renan.umburanas@gmail.com

Marcelo Marques Lopes Muller

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5466-2398>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: mmuller@unicentro.br

Resumo

Neste estudo, foram avaliadas doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato de enraizamento, quanto ao crescimento, nutrição e qualidade de mudas clonais de erva-mate. Foram utilizados diferentes níveis de Al^{3+} incorporados ao substrato na forma de sulfato de alumínio (0,00; 2,25; 4,50; 9,00 e 18,00 g dm^{-3}). Aos 90, 150, 215 e 300 dias após a estaquia (DAE), foram avaliados atributos morfológicos e índice SPAD das mudas. Aos 90 e 300 DAE, avaliou-se a consistência do torrão, peso de matéria fresca e seca de raízes, caule e folhas. Com base nesses atributos, calculou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), e com as folhas determinou-se a área foliar e os teores de macro e micronutrientes e Al. O crescimento das mudas foi influenciado pelo fornecimento de Al^{3+} e pelo tempo. Os valores máximos de diâmetro do colo, altura, número de folhas, matéria seca de folhas e área foliar aos 300 DAE foram observados na dose 9,00 g dm^{-3} de sulfato de alumínio (SA). O teor foliar de Al foi maior na dose 9,00 g dm^{-3} de SA, e os teores de Ca e K foram reduzidos em função da aplicação das doses de SA. A qualidade (IQD) foi afetada positivamente pelo fornecimento de Al^{3+} , aumentando até a dose 9,00 g dm^{-3} de SA. Foi possível concluir que a dose de 9,00 g dm^{-3} de sulfato de alumínio no substrato proporcionou os melhores resultados na produção de mudas clonais de erva-mate.

Palavras-chave: Crescimento; Qualidade; Desenvolvimento inicial.

Abstract

In this study, doses of aluminum (Al^{3+}) in the rooting substrate were evaluated for growth, nutrition and quality of yerba mate clonal seedlings. Different levels of Al^{3+} were incorporated into the substrate in the form of aluminum sulphate (0.00; 2.25; 4.50; 9.00 and 18.00 g dm^{-3}). At 90, 150, 215 and 300 days after planting the cuttings (DAE), morphological attributes and seedling SPAD index were evaluated. At 90 and 300 DAE, the consistency of the clod (root ball), fresh and dry matter of roots, stem, and leaves were evaluated. Based on these attributes, the Dickson Quality Index (IQD) was calculated, and the leaves were used to determine the leaf area and the concentrations of macro and micronutrients and Al. The growth of the seedlings was influenced by Al^{3+} supply and the time of evaluation. The

maximum values of neck diameter, height, number of leaves, and dry matter of leaves and leaf area at 300 DAE were observed with the dose of 9.00 g dm⁻³ of aluminum sulfate (SA). The leaf concentration of Al was higher in the dose 9.00 g dm⁻³ of SA, and the concentrations of Ca and K were reduced due to the application of SA doses. The quality (IQD) was positively affected by Al³⁺ supply, increasing up to the application of 9.00 g dm⁻³ of SA. It was concluded that the dose of 9.00 g dm⁻³ of aluminum sulfate in the substrate provided the best results in the production of clonal seedlings of yerba mate.

Keywords: Growth; Quality; Initial development.

Resumen

En este estudio, se evaluaron dosis de aluminio (Al³⁺) en el sustrato de enraizamiento en cuanto al crecimiento, la nutrición y la calidad de las plántulas de yerba mate. Se utilizaron diferentes niveles de Al³⁺ incorporados al sustrato en forma de sulfato de aluminio (0,00; 2,25; 4,50; 9,00 y 18,00 g dm⁻³). A los 90, 150, 215 y 300 días después de plantar los esquejes de yerba mate (DAE), se evaluaron los atributos morfológicos y el índice SPAD de la plántula. A los 90 y 300 DAE, se evaluó la consistencia del cepellón (del sustrato de enraizamiento), peso fresco y seco de raíces, tallos y hojas. Con base en estos atributos se calculó el Índice de Calidad de Dickson (IQD), y utilizando las hojas se determinó el área foliar y el contenido de macro y micronutrientes y de Al. El crecimiento de las plántulas fue influenciado por el aporte de Al³⁺ y por el tiempo de evaluación. Los valores máximos de diámetro de cuello, altura, número de hojas, materia seca de hojas y área foliar a los 300 DAE se observaron en la dosis de 9,00 g dm⁻³ de sulfato de aluminio (SA). El contenido foliar de Al fue mayor en la dosis de 9,00 g dm⁻³ de SA, y los contenidos de Ca y K fueron reducidos en función de la aplicación de las dosis de SA. La calidad de las plántulas (IQD) fue positivamente afectada por el suministro de Al³⁺, aumentando hasta la dosis de 9,00 g dm⁻³ de SA. Se puede concluir que la dosis de 9,00 g dm⁻³ de sulfato de aluminio en el sustrato proporcionó los mejores resultados en la producción de plántulas clonales de yerba mate.

Palabras clave: Crecimiento; Calidad; Desarrollo inicial.

1. Introdução

O Alumínio (Al) é o metal mais abundante na constituição do solo, por sua participação na mineralogia (Faquin, 1994; Mattiello et al., 2008). Na maioria das plantas, ele apresenta efeito tóxico, variável de acordo com as espécies químicas que se formam em

solução em função das reações de hidrólise, sendo Al^{3+} (alumínio monomérico) a de maior interesse (Kinraide, 1991), pois é a principal forma fitotóxica.

O principal sintoma de toxidez é a redução do crescimento radicular, devido à alteração de diferentes mecanismos e estruturas celulares, que afetam a síntese de DNA e a regulação de proteínas que controlam o ciclo das células. Em espécies reativas de oxigênio-cálcio e de sinalização mediada por cálcio (Ca), a toxidez causada pelo Al^{3+} favorece a interrupção da homeostase, que levam ao início da inibição do crescimento radicular (Achary et al., 2013; Echart & Cavalli-Molina, 2001).

No entanto, trabalhos demonstram respostas diferentes ao Al^{3+} em certas espécies, como o efeito benéfico observado por Benedetti et al. (2017) em plantas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil). Algumas plantas possuem compostos fenólicos, moléculas e enzimas antioxidantes que operam como mecanismos de tolerância, protegendo-as de estresse oxidativo (Fernandes; Souza & Santos, 2018; Hartwig et al., 2007). As plantas podem apresentar habilidade de absorver, acumular e tolerar metais pesados, e responder de diferentes formas à presença desses metais, dependendo da concentração do íon, espécie e estágio de desenvolvimento da planta (Fernandes; Souza & Santos, 2018).

A dispersão natural da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) compreende solos de baixa fertilidade natural, pH ácido e elevado teor de Al^{3+} (Oliveira & Rotta, 1985; Carvalho, 2003). Dentre as espécies que toleram altos níveis de Al^{3+} no solo, muitas acumulam elevados teores do elemento em seus tecidos, como meio de desintoxicação interna (Hartwig et al., 2007). Em erva-mate, é possível encontrar teores acima de 1000 mg kg^{-1} de Al^{3+} nas folhas, suficiente para classificá-la como tolerante (Reissmann; Radomski & Quadros, 1999).

Plantas tolerantes apresentam, por padrão, bom crescimento radicular, o que lhes garante absorver os nutrientes de que precisam, podendo decorrer do próprio mecanismo de adaptação ao Al^{3+} (Hartwig et al., 2007). Plantas de chá estão entre as mais tolerantes ao Al^{3+} , e embora o mecanismo ainda não seja bem conhecido, há indícios de que o estímulo do desenvolvimento radicular observado na presença do Al^{3+} seja indireto, relacionado à competição do Al^{3+} com outros elementos, principalmente cobre, zinco e fósforo (Furlani, 2012). Benedetti et al. (2017) observaram maior crescimento de raízes de erva-mate sob elevados teores de Al^{3+} , e segundo Oliveira & Rotta (1985) existem indícios de benefícios do Al^{3+} ao desenvolvimento da erva-mate.

Os efeitos do Al^{3+} no metabolismo das plantas afetam seu desenvolvimento. No caso de mudas, a qualidade final pode ser avaliada por parâmetros como a relação entre a parte aérea e o sistema radicular, diâmetro do colo compatível com o peso da parte aérea, e

uniformidade entre os lotes, parâmetros que se relacionam com o sucesso do plantio no campo (Gasparin et al., 2014; Pentead Junior & Goulart, 2019).

Nesse contexto, e como é importante definir técnicas e protocolos que melhor se adaptem à produção de mudas, a fim de se obter material de qualidade superior em um menor espaço de tempo e que garanta maiores ganhos produtivos e econômicos, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do Al^{3+} aplicado no substrato de enraizamento sobre o crescimento, nutrição e qualidade de mudas clonais de erva-mate.

2. Metodologia

Trata-se de uma pesquisa experimental qualitativa (Pereira, Shitsuka, Parreira, & Shitsuka, 2018), conduzida em casa de vegetação em um viveiro florestal localizado em Entre Rios, município de Guarapuava, Paraná. O clima local é Subtropical Mesotérmico Úmido (Cfb) segundo a classificação de Köppen, com temperatura média abaixo de 18 °C no mês mais frio, e abaixo de 22 °C no mês mais quente, sem estação seca definida (Iapar, 2015).

Com base no teor de Al^{3+} do solo de um erval nativo da região (4 cmolc dm^{-3} ou 0,36 g dm^{-3} de Al^{3+}), definiram-se quatro doses de Al^{3+} a serem incorporadas ao substrato de enraizamento das mudas: 0,36; 0,72; 1,44; e 2,88 g dm^{-3} de Al^{3+} , além de um controle sem adição de Al^{3+} . Para tanto, utilizou-se como fonte o sulfato de alumínio P.A. [$Al_2(SO_4)_3$], nas seguintes doses: 0,00; 2,25; 4,50; 9,00 e 18,00 g dm^{-3} . O substrato utilizado pelo viveiro, composto por turfa *Sphagno*, vermiculita, resíduo orgânico e calcário, foi amostrado e analisado para caracterização química inicial (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química¹ do substrato comercial utilizado no estudo.

Substrato	pH		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}
	H ₂ O	CaCl ₂			
Carolina Soil®	5,5	4,3	15,10	6,10	0,05

¹Metodologia adaptada de IAPAR (1992): extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} por KCl 1 mol L^{-1} , pH em H₂O e em CaCl₂ 0,01 mol L^{-1} . Fonte: Autores.

Em outubro de 2018, foram preparadas estacas de erva mate com 6 a 10 cm de comprimento, a partir matrizes da cultivar BRS BLD Aupaba com três anos, conduzidas em mini jardim clonal sob sistema semi-hidropônico, composto por calhas preenchidas com areia industrial. Após corte em bixel, as estacas foram plantadas em tubetes de 50 cm^3 (uma estaca tubete⁻¹), contendo o substrato com os níveis de Al^{3+} . O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso (DBC), com seis repetições. Foram preparadas seis bandejas (blocos),

cada uma contendo 20 mudas (tubetes) para cada dose de Al^{3+} no substrato (cinco doses), somando-se 100 mudas por bandeja e um total de 600 mudas no início do experimento.

As bandejas passaram os primeiros 120 dias após a estaquia (DAE) em casa de vegetação com 30% de sombreamento, microaspersão e 70% de umidade relativa do ar. Aos 20 DAE, deu-se início à adubação foliar, para a qual aforam dissolvidos 5 g de fosfato de potássio [KH_2PO_4] e 5 g de nitrato de cálcio [$Ca(NO_3)_2$] em 20 litros de água, sendo pulverizados com bomba costal a uma taxa média de $0,2 \text{ L bandeja}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Aos 120 DAE, reduziu-se a aspersão e o sombreamento, e na adubação foliar utilizou-se 630 g de fosfato de amônio [$NH_4H_2PO_4$], 320 g de nitrato de cálcio [$Ca(NO_3)_2$], 270g de nitrato de potássio [KNO_3], 7,5 g EDDHA [$C_{18}H_{16}N_2O_6FeNa$], 9 g ácido bórico [H_3BO_3] e 200 g de Rexolin® (quelato de Fe microgranulado) dissolvidos em 500 L de água, sendo aplicados $5 \text{ L bandeja}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ por microaspersão. A partir de 150 DAE, retirou-se o sombreamento e o volume aspergido de solução adubadora foi diminuído para $3 \text{ L bandeja}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Avaliações não destrutivas das mudas foram realizadas aos 90, 150, 215 e 300 DAE, respectivamente em janeiro, março, maio e agosto de 2019, determinando-se valores médios de: altura, com régua graduada, entre a superfície do substrato e o ápice do caule; diâmetro do colo com paquímetro digital, ao nível da superfície do substrato; número de folhas, por contagem; índice SPAD com clorofilômetro SPAD-502 (marca Minolta), e sobrevivência das mudas, calculada por meio da expressão:

$$\text{Sobrevivência (\%)} = \frac{\text{número de estacas vivas e enraizadas}}{\text{número total de estacas plantadas}} * 100$$

Aos 90 DAE foram tomadas 3 mudas ao acaso por tratamento em cada repetição, e aos 300 DAE foram tomadas todas as mudas restantes, a fim de realizar avaliações destrutivas. As mudas foram então separadas em raízes, caule e folhas, enxaguadas com água destilada sobre peneira, e secas com papel absorvente. Em seguida, realizou-se a pesagem em balança de precisão para determinar a matéria fresca de raízes (MFR), caule (MFC) e folhas (MFF), sendo as últimas submetidas ao integrador de área foliar (marca Licor). Em seguida, esse material foi secos em estufa com circulação de ar a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas e novamente pesado, determinando-se a matéria seca de raízes (MSR), caule (MSC) e folhas (MSF). Aos 90 DAE, entretanto, não houve raízes suficientes para as pesagens, somente aos 300 DAE. Com base nestes valores, determinou-se a porcentagem de matéria seca (MS) de cada parte vegetal por meio da expressão:

$$MS(\%) = \frac{\text{matéria seca}}{\text{matéria fresca}} * 100$$

Com base na avaliação aos 300 DAE, calculou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para as mudas, por meio da expressão (DICKSON, 1960):

$$IQD = \frac{\text{matéria seca total (g)}}{\left(\frac{\text{altura (cm)}}{\text{diâmetro do colo (mm)}}\right) + \left(\frac{\text{matéria seca de parte aérea (g)}}{\text{matéria seca de raízes (g)}}\right)}$$

Onde: Matéria seca total da muda é a somatória de MSR, MSC e MSF; e matéria seca de parte aérea é a somatória de MSC e MSF.

Também aos 300 DAE, avaliou-se a consistência do torrão, por meio de metodologia adaptada de Aguiar et al. (1989). Ao retirar o tubete plástico, a muda foi avaliada visualmente, atribuindo-se notas de zero a cinco conforme os critérios: 0 - muda totalmente destorroad, com raízes nuas ou quebradas; 1 - ausência de $\frac{2}{3}$ do substrato e/ou sistema radicular e/ou torrão quebrados; 2 - ausência de $\frac{1}{2}$ do substrato e/ou sistema radicular; nota 3 - ausência de $\frac{1}{3}$ do substrato e/ou sistema radicular, que fica solto do torrão e bastante aderente ao tubete; 4 - substrato e sistema radicular completos, com pouca ou muita compactação, pouco aderente ao tubete; 5 - substrato e sistema radicular completos, compactação adequada e ausência de aderência, como observado na escala de notas na Figura 1.

Figura 1. Adaptação da escala de notas de Aguiar et al. (1989) para avaliar a consistência do torrão de mudas de erva-mate, formadas por estaquia em tubetes de 50 cm³. Foto de avaliação aos 300 dias após a estaquia (Guarapuava, 2019).



Fonte: Autores.

As folhas secas foram moídas em almofariz e analisadas no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Unicentro, determinando-se teores de: N, após digestão sulfúrica ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$); e P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn e Al, após digestão nitro-perclórica ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$) em bloco digestor (Embrapa, 2009). Separado das raízes por peneiramento, o substrato foi seco em estufa a $50\text{ }^\circ\text{C}$, moído em almofariz e analisado segundo metodologia adaptada de IAPAR (1992): pH em H_2O (1:2,5) e em CaCl_2 $0,01\text{ mol L}^{-1}$, extração de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} por KCl 1 mol L^{-1} , com determinação de Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrometria de absorção atômica, e determinação de Al^{3+} por titulação.

Os dados foram testados quanto à normalidade (Shapiro Wilk) e submetidos à análise de variância ($\alpha = 0,05$), utilizando DBC para matéria seca de raízes, consistência de torrão e índice de qualidade de Dickson, avaliados somente aos 300 DAE, e DBC em esquema de parcelas subdivididas no tempo para os demais atributos. Em caso de significância para o tempo de crescimento das mudas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro. Os efeitos das doses de Al^{3+} foram estudados por análise de regressão, ajustando-se modelos lineares e quadráticos, cujo critério de seleção foi a magnitude dos coeficientes de determinação dentre modelos significativos a 5% pelo teste F. Para estas análises, utilizou-se o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). A dose de Al^{3+} com máxima eficiência técnica foi calculada igualando-se a zero a derivada primeira dos modelos selecionados.

3. Resultados e Discussão

3.1 Crescimento das mudas

Houve interação entre doses de Al^{3+} e tempo de crescimento das mudas quanto ao diâmetro do colo (DC), que aumentou a cada nova avaliação das mudas em todas as doses de Al^{3+} , à exceção da dose de $18,00\text{ g dm}^{-3}$ de sulfato de alumínio (SA), em que o DC não aumentou entre os 150 e os 2015 DAE (Tabela 2).

Em todas as avaliações, o DC respondeu quadraticamente às doses de SA, com aumento dos valores até a dose de $9,00\text{ g dm}^{-3}$ de SA no substrato, diminuindo com a dose de 18 g dm^{-3} (Tabela 2). Os valores de DC foram superiores aos indicados para plantio de espécies como *Eucalyptus grandis* (Lopes, Guerrini & Saad, 2007; Gomes, Paiva & Couto, 1996) e *Corymbia citriodora* (Castro et al., 2016), ficando acima de 2 mm. Maior DC resulta

em maior sobrevivência das mudas, permitindo melhor adaptação às condições do ambiente no campo (Grossnickle, 2012), sendo um indicador de rusticidade em plantas jovens.

Tabela 2. Diâmetro do colo, altura, número de folhas e índice SPAD de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE	150 DAE	215 DAE	300 DAE
	----- Diâmetro do colo (mm) -----			
0	2,46 d ¹	2,62 c	2,89 b	3,04 a
2,25	2,53 d	2,78 c	3,04 b	3,24 a
4,50	2,56 d	2,79 c	2,88 b	3,30 a
9,00	2,81 d	2,93 c	3,19 b	3,48 a
18,00	2,40 c	2,72 b	2,77 b	2,96 a
Média	2,55	2,76	2,95	3,20
Linear	-	-	-	-
Quadrático	**0,87 ²	**0,96	**0,59	**0,97
	----- Altura (cm) -----			
0	4,51 d	5,65 c	7,63b	9,04 a
2,25	4,40 d	5,56 c	8,62 b	10,13 a
4,50	4,40 c	5,16 c	8,21 b	10,70 a
9,00	4,40 c	5,05 c	10,92 b	12,79 a
18,00	4,20 b	4,88 b	8,69 a	9,48 a
Média	4,38	5,26	8,81	10,42
Linear	n.s.	*80,8	-	n.s.
Quadrático	n	n.s.	**0,70	**0,91
	----- Número de folhas (nº planta ⁻¹) -----			
0	2,55 c	2,94 c	5,11 b	8,49 a
2,25	3,20 c	3,35 c	6,80 b	10,34 a
4,50	3,12 c	3,21 c	6,68 b	10,54 a
9,00	3,23 c	3,42 c	8,21 b	13,23 a
18,00	2,74 c	3,47 c	6,83 b	7,91 a
Média	3,96	3,27	6,72	10,10
Linear	n.s.	n.s.	-	-
Quadrático	*0,77	n.s.	**0,89	**0,91
	----- Índice SPAD -----			
0	42,29 a	42,03 a	42,75 a	42,84 a
2,25	44,17 b	43,08 b	43,08 b	54,53 a
4,50	41,11 c	40,66 c	47,86 b	53,69 a
9,00	42,56 b	43,46 b	43,75 b	54,78 a
18,00	42,92 b	42,88 b	43,13 b	49,95 a
Média	43,21	42,42	44,11	51,15
Linear	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Quadrático	n.s.	n.s.	n.s.	**0,69

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

A altura das mudas foi afetada pelo tempo, apresentando aumento a cada nova avaliação. A análise de regressão mostrou ajuste linear às doses de SA aos 150 DAE e quadrático aos 215 e 300 DAE, neste caso com aumento até a dose de 9,00 g dm^{-3} de SA (Tabela 2). À exceção do controle e da maior dose de SA (18 g dm^{-3}), os valores ficaram

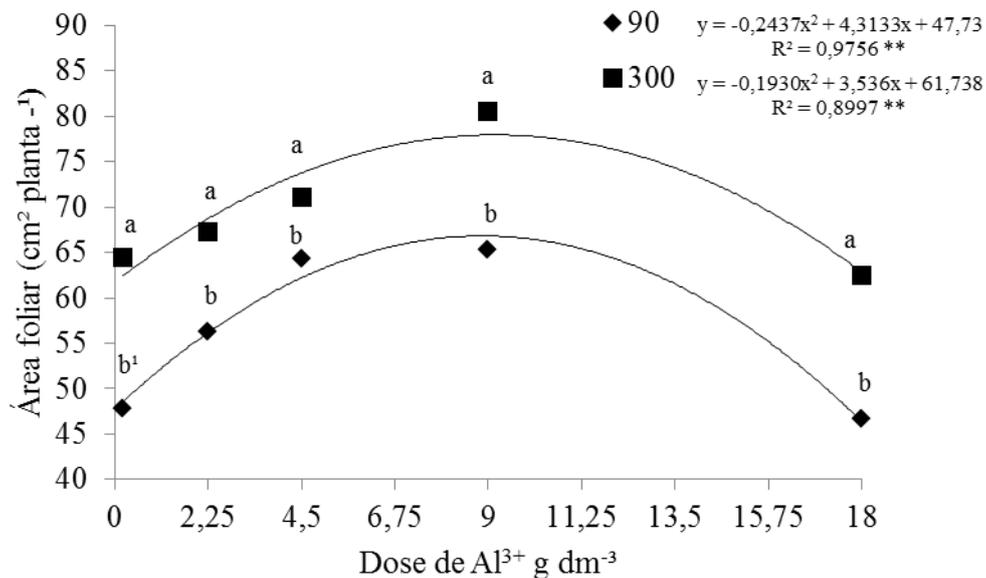
acima de 10 cm aos 300 DAE, em acordo com os resultados de Wendling, Gustala & Domingos (2006) para mudas seminais em substrato comercial. Em estudo com mudas de erva-mate sob doses de Al^{3+} em solução nutritiva, Benedetti (2012) observou altura de 10,4 cm para o clone 1, e de 24,7 e 27,5 cm para os clones 2 e 3. Mudas ideais para o plantio devem ter pelo menos 12 cm de altura e DC próximo de 3 mm (Penteado Junior e Goulart, 2019), o que foi observado na dose de $9,00\text{ g dm}^{-3}$ de SA.

O número de folhas (NF) apresentou efeitos similares aos observados para a altura, observando-se aumento no NF com o decorrer das avaliações (Tabela 2). Houve efeito de regressão, com ajuste quadrático às doses de Al^{3+} também aos 215 e 300 DAE, e o maior NF foi observado também com $9,00\text{ g dm}^{-3}$ de SA (Tabela 2). Maior NF sob doses de Al^{3+} também foi observado por Castro et al. (2016), em mudas de *Corymbia citriodora*.

O índice SPAD, indicativo do teor de clorofila, apresentou efeito do tempo de crescimento das mudas, aumentando até os 300 DAE, com exceção ao controle sem Al^{3+} (Tabela 2). Quanto ao efeito do Al^{3+} , aos 300 DAE houve ajuste quadrático, com aumento do SPAD até $9,00\text{ g dm}^{-3}$ de SA. Em estudo com *Taricha granulosa*, Freitas et al. (2017) também observaram incremento no conteúdo de clorofila nas plantas positivamente afetadas pela aplicação de Al^{3+} , aos 45 dias de cultivo.

Com as avaliações aos 90 e 300 DAE, observou-se interação entre doses de Al^{3+} e tempo de crescimento sobre a área foliar (AF) das mudas, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2. Área foliar de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, avaliadas aos 90 e 300 dias após a estaquia em Guarapuava (2019).



**significativo com $p < 0,01$. ¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Os valores aumentaram entre 90 e 300 DAE e houve ajuste quadrático em função das doses de Al^{3+} em ambas avaliações (Figura 2), com elevação da AF até $9,00 \text{ g dm}^{-3}$ de SA, que resultou nos maiores benefícios também para DC (90, 150, 215 e 300 DAE), altura e NF (215 e 300 DAE), e índice SPAD (300 DAE). Benedetti (2012) também obteve AF maior em mudas de erva-mate com aplicação de Al^{3+} . Zerbielli (2016) obteve correlação significativa entre o teor de Al^{3+} no solo e a área foliar de plantas de erva-mate com sete anos de idade, em erval plantado sob Floresta Ombrófila Mista em Guarapuava-PR.

AF é um atributo importante para o desempenho das plantas, pois o processo fotossintético depende da interceptação de energia luminosa e sua conversão em energia química, sendo a superfície foliar da planta a base do rendimento potencial de uma cultura (Favarin et al., 2002). Como não houve efeito significativo das doses de Al^{3+} sobre o número de folhas até 215 DAE, a maior AF já aos 90 DAE em função do Al^{3+} demonstra efeito positivo do elemento sobre a expansão da lâmina foliar (folhas maiores).

Além de ir ao encontro das observações de tolerância da erva-mate ao Al^{3+} , o maior crescimento das mudas evidencia os benefícios do Al^{3+} ao crescimento inicial de plantas de erva-mate, como observado por Benedetti (2012). Em plantas acidófilas, os benefícios do Al^{3+} vão além do crescimento, melhorando também seu metabolismo, como observado no índice

SPAD, indicativo do maior teor de clorofila nas folhas, tanto no presente estudo quanto no estudo com *Tibouchina granulosa* realizado por Freitas et al. (2017).

Resultados semelhantes também foram constatados em *Corymbia citriodora* (CASTRO et al., 2016), *Apuleia leiocarpa* (Fortunato & Teixeira, 2004) e *Psidium guajava* (Salvador et al. 2000), consideradas acidófilas (Osaki et al., 1997), tolerantes a solos ácidos, condição em que os teores de Al^{3+} naturalmente aumentam, como resposta de solubilidade da fração mineral, que normalmente é composta por oxigênio, silício e alumínio, além de outros elementos químicos menos abundantes (Brady & Weil, 2013), sobretudo em ambientes tropicais e subtropicais.

Não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a matéria fresca de folhas (MFF) (Tabela 3). Para matéria fresca de caule (MFC) não houve interação, mas houve efeito dos tratamentos, com aumento entre 90 e 300 DAE (Tabela 3) e ajuste quadrático em função dos níveis de Al^{3+} aos 300 DAE. A MFC aumentou até 9 g dm^{-3} de SA (Tabela 3). Já a matéria fresca de raízes (MFR), avaliada uma única vez, respondeu aos níveis de Al^{3+} , com ajuste quadrático e valor máximo na dose de 9 g dm^{-3} de SA (Tabela 3).

Tabela 3. Matéria fresca de folhas (MFF), de caule (MFC) e de raízes (MFR) de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE		300 DAE		300 DAE
	MFF (g planta^{-1})		MFC (g planta^{-1})		MFR (g planta^{-1})
0	1.11	2.39	0,73	1,61	2,04
2,25	1.45	2.70	0,62	1,96	2,70
4,50	1.60	2.56	0,66	2,09	2,90
9,00	1.62	2.96	0,66	2,52	3,43
18,00	1.45	2.48	0,57	1,97	2,69
Média	1,46	2,61	0,64b ¹	2,03a	2,75
Linear	n.s.		-	-	-
Quadrático	n.s.		n.s.	20,96**	**0,97

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coeficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Quanto à matéria seca de folhas (MSF) e de caule (MSC), houve resposta aos tratamentos, mas sem interação (Tabela 4). Ambas aumentaram entre 90 e 300 DAE, e ambas responderam quadraticamente às doses de Al^{3+} , com aumento dos valores até $9,00 \text{ g dm}^{-3}$ de SA no substrato (Tabela 4). A matéria seca de raízes (MSR) foi avaliada somente aos 300 DAE, mas respondeu ao Al^{3+} , também de forma quadrática, com aumento até $9,00 \text{ g dm}^{-3}$ de SA (Tabela 4).

Tabela 4. Matéria seca foliar, de caule de raízes (g planta⁻¹) de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al³⁺) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al ³⁺ (g dm ⁻³)	90 DAE MSF (g planta ⁻¹)	300 DAE MSF (g planta ⁻¹)	90 DAE MSC (g planta ⁻¹)	300 DAE MSC (g planta ⁻¹)	300 DAE MSR (g planta ⁻¹)
0	0,31	0,70	0,22	0,49	0,29 d
2,25	0,46	0,93	0,19	0,63	0,37 c
4,50	0,56	1,00	0,21	0,69	0,37 c
9,00	0,59	1,24	0,21	0,77	0,72 a
18,00	0,42	0,95	0,17	0,61	0,37 c
Média	0,46b ¹	0,96a	0,20b	0,63a	0,42
Linear	-	-	-	-	-
Quadrático	n.s.	**0,97 ²	n.s.	**0,98	**0,89

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r²) dos ajustes dos modelos; **p<0,01; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Em experimento com *Mimosa artemisiana*, Presotto et al. (2018) concluíram que a espécie apresenta aumento de biomassa radicular em concentrações intermediárias de Al³⁺ na solução nutritiva. Já na erva-mate, a aplicação de doses de Al³⁺ estimulou o crescimento de raízes, proporcionando maior incremento em volume total do sistema radicular e comprimento radicular com doses acima de 1.219 µmol L⁻¹ de Al³⁺ (Benedetti et al., 2017).

O teor de MSF sofreu efeito tanto do Al³⁺ quanto do tempo, aumentando entre 90 e 300 DAE (Tabela 5), e com resposta quadrática às doses de Al³⁺ em ambas as avaliações, sendo os maiores valores observados com 9,00 g dm⁻³ de SA (Tabela 5). A diferença entre esta dose e o controle sem Al³⁺ foi de 30% aos 90 DAE e 42% aos 300 DAE. Salvador et al. (2000) observou resultado similar em mudas de goiabeira, com redução de efeito positivo do Al³⁺ a partir de 15 mg L⁻¹ de Al³⁺ em solução nutritiva.

Tabela 5. Porcentagem de matéria seca foliar, de caule de raízes de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE		300 DAE		300 DAE
	MSF (%)		MSC (%)		MSR (%)
0	28,21	35,45	30,60	34,96	14,53
2,25	31,91	42,89	31,50	34,11	13,98
4,50	35,20	48,81	32,80	34,85	16,63
9,00	36,79	50,20	32,46	35,96	21,41
18,00	28,49	39,33	31,03	36,63	13,94
Média	32,12b ¹	43,33a	31,68 b	35,30 a	16,09
Linear	-	-	n.s		-
Quadrático	**0,99 ²	**0,97	n.s		**0,74

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Já teor de MSC sofreu efeito somente do tempo, aumentando aos 300 DAE (Tabela 5). Como as mudas foram formadas por estaquia, a maior parte da biomassa do caule era da própria estaca, determinando menor impacto dos tratamentos. Por sua vez, as raízes, que não apresentaram biomassa suficiente para serem avaliadas aos 90 DAE, tiveram efeito do Al^{3+} sobre o teor de matéria seca aos 300 DAE. A MSR aumentou de forma quadrática até 9,00 g dm^{-3} de SA (Tabela 5), sendo de 47% a diferença entre esta dose e o controle sem Al^{3+} , demonstrando haver maior efeito do Al^{3+} no teor de MSR do que no teor de MSF.

Considerando os atributos de crescimento e biomassa das mudas, a dose de 9,00 g dm^{-3} de SA proporcionou os melhores resultados, e o cálculo de máxima eficiência técnica apresentou resultados muito próximos de 9,00 g dm^{-3} de Al^{3+} . Tais resultados confirmam que a erva-mate é uma espécie cujo crescimento é estimulado na presença de Al^{3+} , mas que esse estímulo vai até certo ponto, sendo prejudicada sob teores muito elevados do elemento.

3.2 Atributos químicos do substrato

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no substrato apresentaram interação entre dose de Al^{3+} e tempo de crescimento das mudas (Tabela 6). As doses de Al^{3+} causaram quedas lineares nos teores de Ca^{2+} e quanto ao tempo houve aumento dos teores de Ca^{2+} entre os 90 e os 300 DAE, mas só até a dose de 9 g dm^{-3} de SA, sem diferenças significativas com 18 g dm^{-3} de SA. Para Mg^{2+} , houve queda linear em função das doses de Al^{3+} , mas somente aos 300 DAE após a aplicação das mesmas, com redução dos teores com o passar do tempo, em todas as doses aplicadas (Tabela 6).

Tabela 6. Teores de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e enxofre (S-SO_4^{2-}) no substrato em função de doses de alumínio (Al^{3+}), ao longo do tempo de crescimento de mudas de erva-mate, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE	300 DAE	90 DAE	300 DAE	90 DAE	300 DAE
	Ca (cmol _c dm^{-3})		Mg (cmol _c dm^{-3})		Al^{3+} (cmol _c dm^{-3})	
0	13,81 b ¹	18,06 a	5,88 a ¹	5,04 b	0,17 b	1,48 a
2,25	12,76 b	14,58 a	5,87 a	4,82 b	0,26 b	3,03 a
4,50	10,82 b	14,28 a	5,80 a	4,92 b	0,60 b	3,14 a
9,00	10,61 b	12,00 a	5,75 a	3,22 b	1,33 b	4,08 a
18,00	7,84 a	8,15 a	5,64 a	3,10 b	3,42 b	5,71 a
Média	11,16	13,41	5,78	4,22	1,15	3,48
Linear	**0,95 ²	**0,93	n.s.	**0,79	**0,98	**0,94
Quadrático	-	-	n.s.	-	-	-

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Em meio ácido o Ca^{2+} , em parte, é perdido por lixiviação. O Mg^{2+} , por sua vez, não é um cátion adsorvido tão fortemente, portanto é facilmente perdido por lixiviação (Faquin, 1994). De modo geral, quanto mais ácido o meio, menores serão os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Lopes, 1998). Contudo, observa-se que mesmo havendo redução dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} com o aumento das doses de Al^{3+} , não foi possível verificar sintomas de deficiência de tais nutrientes nas mudas, outro indicativo da tolerância da espécie ao Al^{3+} e da rusticidade quanto às demandas de absorção de nutrientes.

Quanto ao Al^{3+} , a interação dose vs. tempo também foi significativa. Os teores aumentaram com o tempo (Tabela 6), como observado para o Ca^{2+} , mas diferentemente desse nutriente os efeitos de regressão foram de aumento linear dos teores de Al^{3+} , em ambas as avaliações (Tabela 6), em resposta direta ao fornecimento de Al^{3+} pelas doses de SA.

Os valores de pH responderam aos tratamentos sem interação. Houve queda quadrática do pH em H_2O e em CaCl_2 com o fornecimento de Al^{3+} e com o tempo (Tabela 7). O Al^{3+} (alumínio monomérico) é um cátion ácido, pois o forma hidróxidos $[\text{Al}(\text{OH})_n]$ ao reagir com a água (H_2O), e dessa reação de hidrólise sobrem íons H^+ em solução (Kinraide, 1991), o que aumenta a acidez e causa queda de pH. Outros trabalhos também obtiveram redução de pH do substrato pela adição de Al^3 (Fortunato & Teixeira, 2004).

Tabela 7. Valores de pH (H₂O e CaCl₂) no substrato em função de doses de alumínio (Al³⁺), ao longo do tempo de crescimento de mudas de erva-mate, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al ³⁺ (g dm ⁻³)	90 DAE	300 DAE	90 DAE	300 DAE
	pH _{H₂O}		pH _{CaCl₂}	
0	5,08	4,73	4,53	3,72
2,25	4,82	4,43	4,40	3,67
4,50	4,73	4,27	4,33	3,63
9,00	4,63	4,19	4,25	3,50
18,00	4,23	4,08	4,10	3,41
Média	4,69 a	4,34 b	4,32 a	3,58 b
Linear	-	-	-	-
Quadrático	**0,91	**0,93	**0,98	**0,96

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r²) dos ajustes dos modelos; **p<0,01; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

3.3 Teor de nutrientes e alumínio nas folhas de mudas de erva-mate

Não houve efeito das doses de Al³⁺ ou interação com o tempo de crescimento das mudas sobre os teores foliares de N, havendo efeito apenas do tempo, com aumento entre 90 e 300 DAE (Tabela 8).

Tabela 8. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) em folhas de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al³⁺) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al ³⁺ (g dm ⁻³)	90 DAE	300 DAE	90 DAE	300 DAE	90 DAE	300 DAE
	N (g kg ⁻¹)		P (g kg ⁻¹)		K (g kg ⁻¹)	
0	4,51	50,24	2,14	0,38	10,18 a	9,80 b
2,25	4,84	52,30	2,24	0,48	8,97 a	9,98 a
4,50	4,23	54,21	2,26	0,56	8,78 b	12,19 a
9,00	4,68	53,50	2,51	0,65	8,23 b	17,49 a
18,00	5,51	52,10	2,36	0,53	8,13 b	12,17 a
Média	4,75b ¹	52,47a	2,38a	0,52b	8,85	12,32
Linear	n.s. ²		n.s.		*0,64	-
Quadrático	n.s.		n.s.		n.s.	*0,79

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r²) dos ajustes dos modelos; **p<0,01; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Nutriente mineral absorvido em maior quantidade pelas plantas, N é o primeiro elemento limitante ao crescimento, devido ao seu envolvimento em vários processos metabólicos, como a fotossíntese (Faquin, 1994). O maior teor foliar de N em resposta ao tempo, cerca de 10 vezes maior aos 300 DAE em relação aos 90 DAE, sem ser afetado pelas

doses de Al^{3+} , é indicativo de que não houve prejuízo do Al^{3+} sobre a capacidade de absorção das mudas, e que o tempo teve grande impacto sobre essa capacidade. Isso se deve, entre outros motivos, ao fato de que aos 90 DAE quase não havia raízes, inclusive inviabilizando sua medição, enquanto aos 300 DAE as raízes já haviam crescido, e então se observou efeito das doses de Al^{3+} . Basso (2000) observou resultado similar com eucalipto, sem efeito do Al^{3+} sobre o teor foliar de N.

Também não houve efeito das doses de Al^{3+} ou interação sobre os teores foliares de P, havendo apenas efeito do tempo, que causou queda da ordem de 74-82% (Tabela 8). Essa redução do P foliar pode ter sido causada pelo crescimento das mudas, causando efeito diluição (Marschner, 1993), ao mesmo tempo em que o pH do substrato caiu aos 300 DAE (Tabela 7), o que afeta negativamente a disponibilidade de P, que pode precipitar em condições ácidas (Poletto et al., 2011). Os teores variaram de 0,38 a 0,65 g kg^{-1} aos 300 DAE, sendo baixos em relação aos obtidos por Oliva et al. (2014) com plantas de erva-mate de 8 anos, que ficaram acima de 1,2 g kg^{-1} . Santin et al. (2013a), com mudas de erva-mate em vaso sob doses de N, P e K, obtiveram P foliar entre 0,9 e 1,7 g kg^{-1} sob 0 e 400 mg dm^{-3} de P_2O_5 , respectivamente.

O K foliar apresentou interação entre os tratamentos. Houve ajuste quadrático dos teores às doses de Al^{3+} em ambas avaliações, com queda aos 90 DAE e aumento aos 300 DAE (Tabela 8), neste caso até a dose de 9,00 g dm^{-3} de SA. No controle sem Al^{3+} , o K foliar diminuiu entre 90 e 300 DAE, não houve diferença entre datas com 2,25 g dm^{-3} , e a partir de 4,50 g dm^{-3} de SA o K foliar aumentou aos 300 DAE (Tabela 8), ficando acima de 12 g kg^{-1} , indicando benefício do Al^{3+} à absorção do nutriente, sobretudo com 9,00 g dm^{-3} de SA. Este resultado difere do obtido por Benedetti (2012), que observou menor absorção de K na presença de Al^{3+} em mudas de erva-mate. Santin et al. (2013a) observaram entre 12 e 16 g kg^{-1} de K em folhas de erva-mate nas melhores combinações de doses de N, P e K para o crescimento das mudas.

O Ca foliar também sofreu efeito de interação (Tabela 9). Os teores aumentaram muito entre 90 e 300 DAE, cerca de 4,5 vezes, em todas as doses de Al^{3+} . Porém, diferentemente do K, o efeito das doses de SA foi linear e causou queda nas duas avaliações, indicando prejuízo do Al^{3+} na absorção de Ca^{2+} . Isso se explica pela inibição mútua entre esses elementos em termos de absorção, como resultado de competição pelos sítios de absorção na planta (Marschner, 1993). Resultado similar foi encontrado por Benedetti (2012), que observou redução no teor de Ca em folhas de erva-mate sob doses de Al^{3+} . A toxidez por Al^{3+} induz à deficiência de Ca, devido ao menor transporte do nutriente nas plantas, sendo o antagonismo

Al^{3+} vs. Ca^{2+} o fator mais limitante à absorção de Ca^{2+} , já que Al^{3+} se liga mais facilmente às pectinas do que o Ca^{2+} (Foy, 1974; Taylor et al., 2000).

Tabela 9. Teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em folhas de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE		300 DAE		90 DAE		300 DAE	
	Ca (g kg^{-1})		Mg (g kg^{-1})		S (g kg^{-1})			
0	3,27 a¹	12,81 b	1,54	1,64	8,15	315,98		
2,25	2,94 a	12,50 b	1,51	1,64	7,51	510,99		
4,50	2,45 a	11,57 b	1,59	1,63	8,07	548,20		
9,00	2,26 a	10,93 b	1,47	1,63	7,60	486,81		
18,00	2,14 a	9,78 b	1,47	1,62	6,63	339,43		
Média	2,61	11,51	1,50b	1,63a	7,59b	440,28a		
Linear	*0,96 ²	*0,98		n.s.		n.s.		
Quadrático	-	-		n.s.		n.s.		

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; * $p < 0,05$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Contudo, segundo Foy (1974), a capacidade de absorver e utilizar Ca^{2+} suficiente na presença de Al^{3+} , sem sinal de deficiência, pode ser indicativo de tolerância das plantas à toxidez de Al^{3+} , e nos resultados, mesmo com redução do teor foliar de Ca, não houve sintoma de deficiência do nutriente. Os teores variaram de 2,61 a 11,51 g kg^{-1} aos 90 e 300 DAE, respectivamente, bem acima da faixa de 1,50 a 4,25 observada por Santin et al. (2013a), em plantas jovens de erva-mate cultivadas em solo adubado com N, P e K.

No caso do Mg, houve efeito apenas do tempo. O teor foliar de Mg aumentou de 1,50 para 1,63 g kg^{-1} entre 90 e 300 DAE (Tabela 9), respectivamente, se aproximando do teor de 2,20 g kg^{-1} observado por Santin et al. (2013a) no ponto de máximo acúmulo de matéria seca aérea de plantas jovens de erva-mate. A tolerância ao Al^{3+} tem sido associada à eficiência na absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} (Foy, 1988). No presente estudo, não houve sintomas visuais de deficiência de Mg em resposta às doses de Al^{3+} .

O teor foliar de S também foi influenciado apenas pelo tempo, aumentando muito entre 90 e 300 DAE (Tabela 9) como no caso do N, cerca de 58 vezes. Este fato tem relação com a presença de S na fonte de Al^{3+} utilizada [$Al_2(SO_4)_3$], em adição ao S presente na formulação do substrato, e ao crescimento e desenvolvimento radicular das mudas com o passar do tempo.

Os teores foliares de Fe, Cu e Zn não apresentaram efeito de interação, e não sofreram influência do Al^{3+} , apenas do tempo, que aumentou os teores de Fe e Zn e diminuiu os teores

de Cu (Tabela 10). O aumento dos teores de Fe e Zn na planta aos 300 DAE possivelmente está relacionado ao aumento dos teores disponíveis, pois, dentre os principais fatores que controlam a atividade de Fe e Zn destaca-se o pH (Lindsay, 2001), que apresenta relação inversa com a solubilidade e disponibilidade desses elementos para as plantas (Sousa et al., 2007; Kabata-pendias, 2011), e na Tabela 7 é possível verificar que o pH do substrato diminuiu dos 90 para os 300 DAE.

Tabela 10. Teores de ferro (Fe), cobre (Cu) e zinco (Zn) em folhas de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE		300 DAE		90 DAE		300 DAE	
	Fe (mg kg^{-1})		Cu (mg kg^{-1})		Zn (mg kg^{-1})			
0	213,80	667,22	120,48	50,89	153,40	595,39		
2,25	185,25	670,26	103,49	44,98	157,53	646,71		
4,50	192,56	734,47	102,33	44,64	162,86	638,12		
9,00	184,21	728,04	87,29	43,53	161,85	649,36		
18,00	181,10	631,91	86,74	41,97	165,66	602,89		
Média	191,36b ¹	686,38a	100,07a	45,20b	160,25b	626,49 ^a		
Linear	n.s. ²		n.s.		n.s.		n.s.	
Quadrático	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	

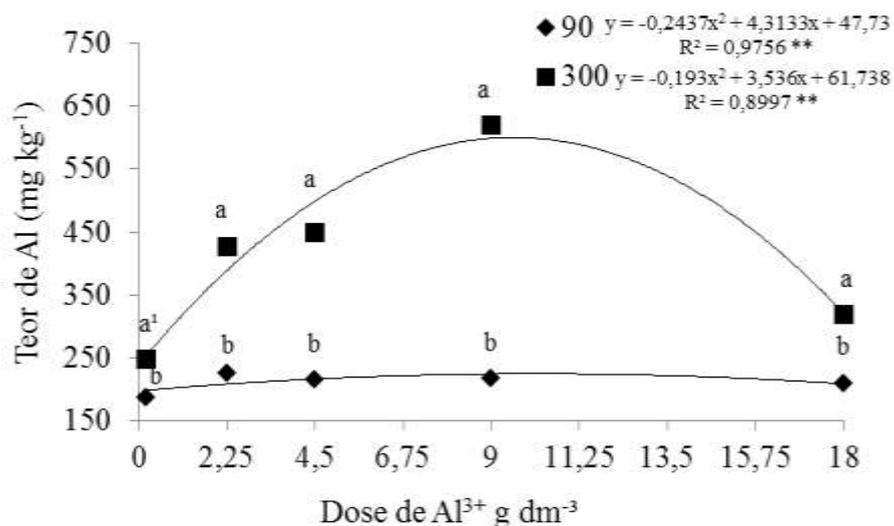
¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%;
²Coefficiente de determinação (r^2) dos ajustes dos modelos; ** $p < 0,01$; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Analisando tecido foliar de plantas jovens de erva-mate cultivadas em vaso com solo, Zampier (2001) observou teores foliares entre 66-100, 5-9 e 50-173 mg kg^{-1} para Fe, Cu e Zn, valores menores que os observados no presente estudo, o que pode ser devido às diferenças de fase e idade das plantas, e às condições de cultivo. No presente estudo foram utilizadas mudas, em substrato rico em nutrientes (turfa, vermiculita, resíduo orgânico) e sob adubação foliar, enquanto o autor plantou mudas em vasos contendo solo pobre teores de nutrientes, abaixo do nível crítico para a erva-mate, e adubou somente com NPK ou húmus de minhoca.

A presença do Al^{3+} reduziu teores foliares de P, K, Ca e Mg em *Hevea brasiliensis* (Bueno, 1987), e os de P, Ca, Mg e S em mudas de *Psidium guajava* (Salvador et al., 2000). No presente estudo, porém, não houve efeito da aplicação de Al^{3+} nos teores foliares da maioria dos nutrientes, havendo impacto sobre o teor foliar de K apenas na maior dose de Al^{3+} , e efeito negativo sobre a absorção de Ca em todas as doses testadas, embora sem sintoma visual de deficiência e benefícios no crescimento das mudas até a segunda maior dose testada, de 9,00 g dm^{-3} de Al^{3+} .

Quanto ao Al foliar, houve interação entre os tratamentos (Figura 3). À exceção do controle sem Al^{3+} , houve acréscimo do Al foliar entre 90 e 300 DAE. Por sua vez, a aplicação de Al^{3+} teve efeito quadrático em ambas as datas, embora com magnitude de resposta dos valores muito maior aos 300 DAE, com destaque para a dose de $9,00 \text{ g dm}^{-3}$ de SA, que também resultou na maior absorção de K^+ aos 300 DAE, maior crescimento e maior índice SPAD das mudas (Tabelas 2 e 3). Assim, confirma-se a tolerância da erva-mate ao Al^{3+} e, mais que isso, benefícios do elemento à espécie. No estudo de Barbosa et al. (2018), o maior teor de Al foliar também foi observado junto com maior crescimento das plantas de erva-mate.

Figura 3. Teor de alumínio (Al) em folhas de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio Al^{3+} no substrato, avaliadas aos 90 e 300 dias após a estaquia em Guarapuava (2019).



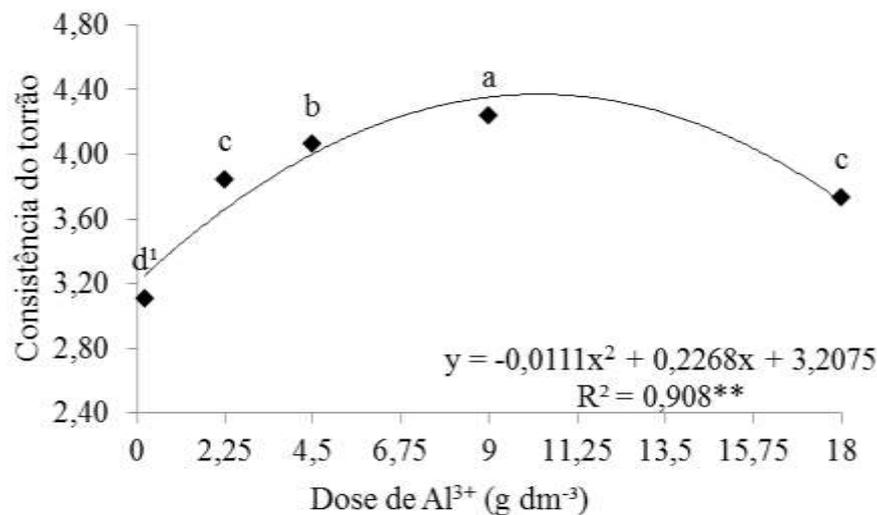
**significativo com $p < 0,01$; ¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Fonte: Autores.

A queda do Al foliar sob $18,00 \text{ g dm}^{-3}$ de SA no substrato, entretanto, indica haver limite ou teor tóxico do Al^{3+} também para a erva-mate, pois mesmo havendo maior disponibilidade do elemento a absorção foi limitada, sendo claros os efeitos negativos dessa dose no crescimento (DC, altura, NF, SPAD, AF, MSF, MSC MSR) e funcionamento (SPAD, absorções de Ca^{2+} e K^+) das mudas. Os teores observados no presente estudo foram semelhantes aos obtidos por Barbosa et al. (2018), mas superaram aqueles verificado por Santin et al. (2013b), que chegaram apenas a 200 mg kg^{-1} de Al foliar, semelhante ao observado no controle sem aplicação de Al^{3+} no presente estudo.

3.4 Qualidade das mudas

Aos 300 DAE, a consistência do torrão apresentou efeito da aplicação de Al^{3+} , que teve efeito quadrático sobre o atributo (Figura 4), aumentando os valores até a dose de 9,00 g dm^{-3} de SA. Como nos demais atributos avaliados, a dose de 18,00 g dm^{-3} de SA reverteu o efeito benéfico do elemento, neste caso como resposta ao efeito deletério sobre o crescimento radicular (Tabela 4), uma vez que a consistência do torrão avalia a capacidade do substrato permanecer aderido às raízes no momento do plantio. A qualidade do enraizamento é fundamental para a sobrevivência da muda no campo, evitando falhas de *stand* e garantindo o sucesso do plantio (Grossnickle, 2012).

Figura 4. Consistência do torrão de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, aos 300 dias após a estaquia em Guarapuava (2019).

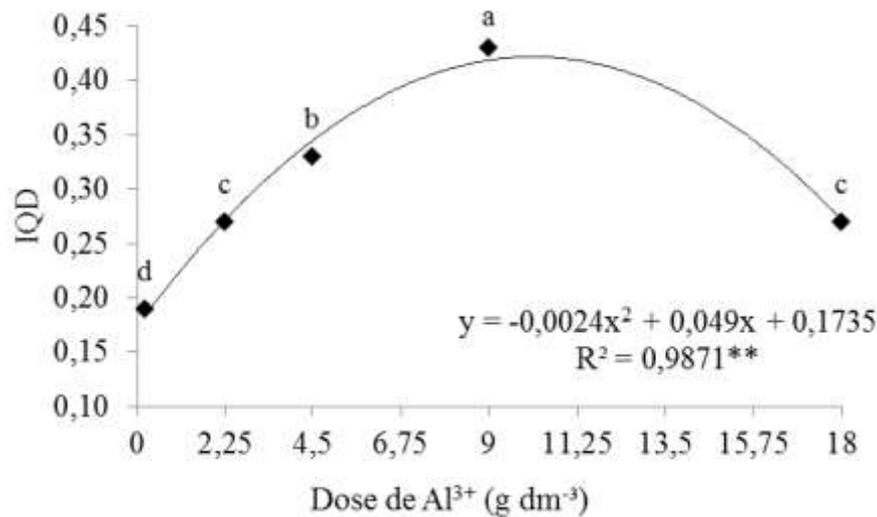


**significativo com $p < 0,01$; ¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Também avaliado aos 300 DAE, o índice de qualidade de Dickson (IQD) sofreu influência da aplicação de Al^{3+} . O ajuste às doses de SA foi quadrático (Figura 5) com máxima eficiência técnica próxima de 9,00 dm^{-3} de SA. Valores de IQD acima de 0,20 correspondem a uma alta qualidade de mudas, de acordo com o padrão estabelecido por Hunt (1990), corroborado por Castro et al. (2016), e no presente estudo apenas o controle sem aplicação de Al^{3+} teve IQD inferior (0,19). Em todos os outros níveis de Al^{3+} o IQD foi superior a 0,20, e chegou a 0,43 com 9,00 $g\ dm^{-3}$ de SA, evidenciando que esta dose resultou

em maior crescimento das mudas e também na formação de mudas equilibradas, com relação favorável entre as frações aérea e radicular, e entre a altura e o diâmetro das mudas.

Figura 5. Índice de qualidade de Dickson (IQD) de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, aos 300 dias após a estaquia em Guarapuava (2019).



**significativo com $p < 0,01$; ¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Em experimento com mudas de erva-mate, Pimentel et al. (2017) observaram IQD entre 0,07 e 0,12 após 120 dias de cultivo. O IQD é um bom indicador da qualidade de mudas, por ser uma medida morfológica integrada, que considera em seu cálculo a robustez e o equilíbrio da distribuição da fitomassa (Fonseca et al., 2002). Portanto, houve melhora da qualidade geral das mudas com a aplicação do Al^{3+} via substrato.

Além da qualidade das mudas, o enraizamento das estacas plantadas e a sobrevivência das mudas até o final do processo de formação são fundamentais na produção de mudas de erva-mate. No presente estudo, a sobrevivência das mudas não apresentou efeito das doses de SA nem efeito de interação, respondendo somente ao tempo.

A sobrevivência diminuiu cerca de 51 pontos percentuais entre 90 e 300 DAE, obtendo-se ao final do processo de produção das mudas uma sobrevivência equivalente a quase 1/3 das estacas plantadas (Tabela 11), valor superior ao encontrado por Graça et al. (1988) para a erva-mate, de cerca de 17%. A sobrevivência aos 90 DAE também foi maior que a obtida por Kratz et al. (2015), que verificou taxa de 58% com estacas de erva-mate plantadas em substrato comercial. A partir de mudas seminais de erva-mate, entretanto, Wendling, Gustala & Domingos (2006) observaram 60% de sobrevivência.

Tabela 11. Sobrevivência de mudas de erva-mate em função de doses de alumínio (Al^{3+}) no substrato, ao longo do tempo de crescimento, em dias após a estaquia (DAE) (Guarapuava, 2019).

Dose de Al^{3+} (g dm^{-3})	90 DAE	300 DAE
	Sobrevivência (%)	
0	82,50	30,83
2,25	87,50	39,16
4,50	90,00	36,66
9,00	85,83	40,00
18,00	86,66	30,00
Média	86,50a ¹	35,33b
Linear		n.s.
Quadrático		n.s.

¹Letras comparam as médias em função do tempo (linha) pelo teste de Tukey, ao nível de 5%; n.s.: não significativo. Fonte: Autores.

Mesmo que os resultados de sobrevivência das mudas tenham sido superiores aos de outros trabalhos com estaquia encontrados na literatura, a ausência de efeito das doses de SA no substrato de plantio das estacas sobre a fase de indução do enraizamento, apesar dos benefícios do elemento no crescimento das raízes, torna necessária a realização de novos estudos que combinem outros fatores à aplicação de Al^{3+} e potencializem a formação de mudas clonais de erva-mate de alta qualidade.

4. Considerações Finais

As mudas de erva-mate se beneficiaram da aplicação de Al^{3+} no substrato, tendo maior crescimento e índice SPAD até a dose de 9,00 g dm^{-3} de sulfato de alumínio (AS). Não houve efeito deletério sobre os teores foliares dos nutrientes, com exceção ao K na maior dose de SA (18,00 g dm^{-3}) e ao Ca em todas as doses, embora sem sintomas de deficiências.

A consistência do torrão e o índice de qualidade de Dickson demonstraram que a qualidade das mudas também melhorou até a dose aplicada de 9,00 g dm^{-3} de SA, mas a sobrevivência durante o processo de produção das mudas não foi afetada.

Sugere-se, para trabalhos futuros, testar outras fontes de alumínio, a combinação das aplicações de alumínio e cálcio no substrato, e avaliar o desempenho das mudas no campo.

Referências

Achary, V., Parinandi, N., & Panda, B. (2013). Calcium channel blockers protect against aluminium-induced DNA damage and block adaptive response to genotoxic stress in plant cells. *Mutation Research*, 751(2), 130-138.

Aguiar, I. B., Valeri, S. V., Banzato, D. A., Corradini, L. & Alvarenga, S. F. (1989). Seleção de componentes de substrato para produção de mudas de eucalipto em tubetes. *IPEF*, (41/42), 37-42.

Barbosa, J. Z., Motta, A. C., Consalter, R., Poggere, G. C., Santin, D., & Wendling, I. (2018). 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*, 90(1), 557-571.

Basso, L. H. M. (2000). *Efeito do alumínio na fisiologia e bioquímica de brotações de Eucalyptus grandis x E. urophylla cultivadas in vitro*. Universidade de São Paulo, Piracicaba. <https://doi.org/10.11606/D.11.2019.tde-20190821-130552>

Benedetti, E. L., Santin, D., Barros, N. F., Pereira, G. L., Martinez, H. P., & Neves, J. C. L. (2017). Alumínio estimula o crescimento radicular de erva-mate? *Pesquisa Florestal Brasileira*, 37(90), 139-147.

Benedetti, E. L. (2012) *Tolerância da erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.) ao alumínio*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/1629>

Brady, N. C., & Weil, R.R. (2013) *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. Porto Alegre: Bookman.

Bueno, N., Pereira, J. P., & Haag, H. P. (1987). Nutrição mineral de seringueira V: deficiência e correção de boro em Hevea brasiliensis. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 44(1), 453-459.

Carvalho, P. E. R. (2003). *Espécies arbóreas brasileiras*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

Castro, E. D., Santos, L. D. T., Fernandes, L. A., & Tajima, C. Y. (2016). Silicato de alumínio em substrato para produção de mudas de *Corymbia citriodora*. *Floresta e Ambiente*, 23(2), 229-236.

Echart, C. L., & Cavalli-Molina, S. (2001). Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. *Cienc. Rural*, 31(3), 531-541.

Faquin, V. (1994). *Nutrição mineral de plantas*. Lavras: FAEPE.

Favarin, J. L., Dourado Neto, D., Garcia, A. G. Y, Villa Nova, N. A. & Favarin, M. G. G. V. (2002). Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(6), 769-773.

Fernandes, M. S., Santos, L. A., & Souza, S. R. (2018). Absorção de nutrientes. In: Fernandes, M.S., Souza, S.R. de & Santos, L. A. *Nutrição mineral de plantas*. (2a ed.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Ferreira, D. F. (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039-1042.

Fonseca, E. P., Valeri, S. V., Miglioranza, E., Fonseca, N. A. N., & Couto, L. (2002). Padrão de Qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. *Revista Árvore*, 26(4), 515–523.

Fortunato, R. P., & Teixeira, F. N. (2004) Toxidez de alumínio em plântulas de grápia (*Apuleia leiocarpa* Vog. Macbride). *Ciência Rural*, 34(1), 89-95.

Foy, C. D. (1974). Effects of aluminum on plant growth. In: Carson, E. W. *The plant root and its environment*. Charlottesville: University Press of Virginia.

Foy, C. D. (1988). Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(7-12), 959-987.

Freitas, K., Teixeira, W., Fagan, E., & Soares, J. (2017). Adaptação de *Tibouchina granulosa* Submetida à Aplicação de Alumínio. *Floresta e Ambiente*, 24, e20160114.

Furlani, A. M. C. (2012). Nutrição mineral. In: Kerbauy, G.B. *Fisiologia vegetal* (2a ed.). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

Gasparin, E., De Avila, A. L., Araujo, M. M., Cargnelutti Filho, A., Dorneles, D. U., & Foltz, D. R. B. (2014). Influência do substrato e do volume de recipiente na qualidade das mudas de *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. em viveiro e no campo. *Ciência Florestal*, 24(3), 553-563.

Gomes, J. M., Paiva, H. N., & Couto, L. (1996). Produção de mudas de eucalipto. *Informe agropecuário*, 18(185), 15-23.

Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5/6), 711-738.

Hartwig, I, Oliveira, A. C., Carvalho, F. I. F., Bertan, I, Silva, J. A. G., Schmidt, A. M., Valério, I., Maia, L. C., Fonseca, D. A. R., & Reis, C. E. S. (2007). Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. *Ciências Agrárias*, 28(2), 219-228.

Hunt, G. A. (1990). Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings. In: Target seedling symposium, meeting of the western forest nursery associations, general technical report RM-200. 218-222.

Hunt, G. A. (1990). Effect of Styroblock Design and Copper Treatment on Morphology of Conifer Seedlings. In: Rose, R.; Campbell, S.J.; Landis, T. D., eds. Proceedings, Fort Collins, U.S. Department of Agriculture. <http://www.fcnet.org/proceedings/1990/hunt.pdf>

Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR. *Cartas climáticas do Paraná*. Online. Recuperado de <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=597>.

Kabata-Pendias A. (2011). *Trace elements in soils and plants*. London, New York, Taylor & Francis.

- Kinraide, T. (1991). Identity of the rhizotoxic aluminium species. *Plant and Soil*, 134(1), 167-178.
- Kratz, D., Pires, P. P., Stuepp, C. A., & Wendling, I. (2015) Produção de mudas de erva-mate por miniestaqueia em substratos renováveis. *Floresta*, 45(3), 609-616.
- Lindsay, W. L. (2001). *Chemical equilibria in soils*. New Jersey: Blackburn.
- Lopes, A. S. (1998). *Manual internacional de fertilidade do solo*. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato.
- Lopes, J. L. W., Guerrini, I. A., & Saad, J. C. C. (2007). Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. *Revista Árvore*, 31(5), 835-843.
- Marschner, H. (1993). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. San Diego: Academic Press.
- Mattiello, E. M., Pereira, M. G., Zonta, E., Mauri, J., Matiello, J. D., Meireles, P. G., & Silva, I. R. (2008). Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio por *Coffea canephora* e *Coffea arabica* sob influência da atividade do alumínio em solução. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1), 425-434.
- Oliva, E. V., Reissmann, C. B., Gaiad, S., De Oliveira, E. B., & Sturion, J. A. (2014). Composição nutricional de procedências e progênies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em latossolo vermelho distrófico. *Ciência Florestal*, 24(4), 793-805.
- Oliveira, Y. M. M. de, & Rotta, E. (1983). Área de distribuição natural de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). In: Embrapa Florestas. *Seminário Sobre Atualidades e Perspectivas Florestais* (10° ed). Curitiba: EMBRAPA-CNPQ.
- Osaki, M., Watanabe, T., & Tadano, T. (1997). Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(3), 551-563.

Penteado Junior, J. F., & Goulart, I. C. G. R. (2016). Erva 20: sistema de produção de erva-mate. In: Embrapa Florestas. *Seminário Erva-Mate* (23a ed). Colombo: Embrapa Florestas.

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica (1a ed.), 1. Santa Maria, RS: UFSM, NTE.

Pimentel, N., Lencina, K. H., Pedroso, M. F., Somavilla, T. M., & Bisognin, D. A. (2017). Morphophysiological quality of yerba mate plantlets produced by mini-cuttings. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(6), 3515-3528.

Poletto, I., Muniz, M. F. B., Ceconi, D. E., & Blume, E. (2011). Influência da aplicação de NPK e calcário sobre o crescimento da erva-mate, severidade da podridão-de-raízes e população fúngica do solo. *Ciência Florestal*, 21(3), 429-444.

Presotto, R. A., Pereira, M. G., Zonta, E., & Mattiello, E. M. (2018). Influência do Al^{3+} em solução nutritiva no crescimento de três espécies florestais utilizadas na recuperação de áreas degradadas. *Ciência Florestal*, 28(1), 384.

Reissmann, C. B., Radomski, M. I., & Quadros, R. M. B. de. (1999). Chemical Composition of *Ilex Paraguariensis* St. Hil. under Different Management Conditions in Seven Localities of Paraná State. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 42(2), 0-0. <https://doi.org/10.1590/S1516-89131999000200009>

Salvador, J. O., Moreira, A., Malavolta, E., & Cabral, C. P. (2000). Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(4), 787- 796.

Santin, D., Benedetti, E. L., Bastos, M. C., Kaseker, J. F., Reissmann, C. B., Brondani, G. E., & De Barros, N.F. (2013a). Crescimento e nutrição de erva-mate influenciados pela adubação nitrogenada, fosfatada e potássica. *Ciência Florestal*, 23(2), p.363-375.

Santin, D., Benedetti, E. L., Kaseker, J. F., Bastos, M. C., Reissmann, C. B., Wendling, I., & Barros, N. F. de. (2013b). Nutrição e crescimento da erva-mate submetida à calagem. *Ciência Florestal*, 23(1), 55-66.

Souza, D. M. G., Miranda, L. N. & Oliveira, S. A. (2007). Acidez do solo e sua correção. 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.

Taylor, G. J., McDonald-stephens, J. L., Hunter, D. B., Bertsch, P. M., Elmore, D., Rengel, Z., & Reid, R. J. (2000). Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. *Plant Physiology*, 123(3), 987-996.

Wendling, I., Gustala, D., & Domingos, D. M. (2006). Substratos para produção de mudas de erva-mate em tubetes plásticos. *Boletim de Pesquisa Florestal*, (52), 21-36.

Zampier, A. C. (2001). *Avaliação dos níveis dos nutrientes, cafeína e taninos em erva-mate (Ilex paraguariensis St. Hil.) após adubação e sua relação com a produtividade*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. <http://hdl.handle.net/1884/674>

Zerbielli, L. C. (2016). *Produtividade, luminosidade, composição química e qualidade da erva-mate*. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava. Recuperado de http://www.unicentroagronomia.com/imagens/noticias/dissertacao_final_luiz_carlos_zerbielli.pdf

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Ana Carolina Ricardi – 40%
Victória Koszalka – 8%
Christian Lopes – 8%
Luciano Farinha – 8%
Tayna Jornada Bem – 8%
Renan Caldas Umburanas – 8%
Marcelo Marques Lopes Muller – 20%