TEOR DE MACRONUTRIENTES EM POSIÇÕES FOLIARES EM MUDAS DE CAFÉ ARÁBICA

Francisco Remigio Cano-Macías, João Paulo de Morais Oliveira, Sônia Maria da Silva, Marcelo Antônio Tomaz, Elias Terra Werner, Milene Miranda Praça Fontes.

Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário, S/N, Guararema, 29500-000 - Alegre - ES, Brasil, Frannk_88@hotmail.com, joaopaulo.ueg@gmail.com, soniamsquimica@gmail.com, tomazamarcelo@yahoo.com.br, elias.werner@ufes.br, milenemiranda@yahoo.com.br.

Resumo

A distribuição de macronutrientes em diferentes posições foliares é relevante para a diagnose nutricional e para a amostragem foliar em *Coffea arabica* L. Este estudo comparou os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em diferentes pares de folhas de mudas de *C. arabica* (var. Arábica 785/10 Catucaí Vermelho), em delineamento inteiramente casualizado, com três posições foliares e três repetições, submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey ($p < 0,05$). Apenas o Mg apresentou diferença significativa entre as posições foliares, com maior teor no terceiro par de folhas, enquanto N, P, K e Ca não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. A correlação de Pearson revelou associação negativa moderada entre N e Ca e entre Ca e Mg. Os teores de Mg e K, independentemente da posição foliar, permaneceram abaixo das faixas de suficiência foliar de referência para a cultura. Os resultados indicam que a posição foliar influencia a distribuição do Mg, ressaltando a importância da padronização da amostragem foliar para sua avaliação nutricional em mudas de cafeeiro.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Diagnose foliar. Nutrição de Planta. Propagação. Viveiro.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias / Agronomia.

Introdução

O cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) é uma das culturas agrícolas de maior importância econômica mundial, respondendo pela maior parte do café comercializado internacionalmente (Sera et al., 2025), com o Brasil como principal produtor e exportador (Campos, 2022). Sua produtividade e qualidade dependem de práticas adequadas de manejo, especialmente da nutrição mineral (Martinez et al., 2014), sendo a análise foliar uma das principais ferramentas para diagnosticar deficiências, suficiências, toxicidades e desequilíbrios nutricionais e orientar os programas de adubação (Prado & Rozane, 2020).

Os macronutrientes apresentam diferentes padrões de mobilidade no floema, o que pode influenciar sua distribuição entre folhas de diferentes idades (White & Brown, 2010). N, P, K e Mg têm maior capacidade de redistribuição para tecidos em crescimento, enquanto o Ca possui mobilidade restrita, permanecendo predominantemente nos tecidos onde foi inicialmente depositado, devido à sua função estrutural e à limitada retranslocação pelo floema (Kerton et al., 2009; De Bang et al., 2021).

A distribuição dos macronutrientes em folhas de diferentes idades é fundamental para a diagnose nutricional e para a padronização da amostragem foliar, já que variações ligadas à posição foliar podem influenciar os teores obtidos em análises químicas (Broschat & Elliott, 2004). Sadeghian-Khalajabadi et al. (2025), em *C. arabica*, observaram redução significativa de N, P, Mg e B entre a antese e a colheita, enquanto K e Ca permaneceram estatisticamente inalterados; Clemente et al. (2008) mostraram ainda que as faixas críticas de macronutrientes variam conforme o estádio de desenvolvimento do cafeeiro, reforçando que a interpretação dos teores foliares deve considerar a fase fenológica.

Apesar da ampla utilização da análise foliar na cultura do cafeeiro, ainda são escassos os estudos que avaliam a distribuição de macronutrientes entre diferentes posições foliares em mudas de *C. arabica*, informação essencial para o aperfeiçoamento da amostragem foliar e para a interpretação da diagnose nutricional. Assim, o presente estudo teve como objetivo comparar os teores foliares de N, P, K, Ca e Mg em diferentes pares de folhas de *C. arabica*, visando fornecer subsídios para o aperfeiçoamento da amostragem foliar em mudas da espécie.

Metodologia

As análises foram conduzidas em mudas de *C. arabica* (var. Arábica 785/10 Catucaí Vermelho), com quatro meses de idade, provenientes de um viveiro comercial localizado na zona rural do município de Ibitirama, Espírito Santo, Brasil. Foram avaliados os teores foliares de N, P, K, Ca e Mg. Para a amostragem, foram selecionados três pares de folhas completamente expandidas, correspondentes ao primeiro (folhas mais velhas), segundo (intermediárias) e terceiro pares (folhas mais jovens completamente expandidas). Foram utilizadas três repetições, sendo cada repetição constituída por uma amostra composta formada pelos pares de folhas provenientes de 10 mudas. Para cada repetição, as folhas correspondentes a cada posição foliar foram reunidas, formando uma única amostra composta destinada às análises químicas. As concentrações dos macronutrientes foram expressas em g kg^{-1} de matéria seca.

Após a coleta, as amostras foliares foram secas em estufa de circulação forçada de ar (60 ± 2 °C) até massa constante e, em seguida, moídas em moinho tipo Wiley (peneira de 0,42 mm) para as determinações químicas. O nitrogênio foi quantificado por colorimetria com reagente de Nessler, utilizando curva-padrão de 0 a 8,0 mg L^{-1} e leitura espectrofotométrica a 480 nm, com o resultado expresso em base de matéria seca. Para os demais macronutrientes (P, K, Ca e Mg), o material foi digerido em solução nítrico-perclórica (3:1), segundo adaptação de Malavolta et al. (1997): aproximadamente 0,5 g de amostra foi aquecido em bloco digestor, primeiro a 120 °C por cerca de 30 minutos e depois entre 180 e 200 °C até a clarificação do extrato, que foi avolumado para 50 mL. Nesse extrato, K, Ca e Mg foram determinadas por espectrometria de absorção atômica e o P por colorimetria a 725 nm, cada elemento com curva-padrão própria.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando as posições foliares como fator experimental, com três níveis (primeiro, segundo e terceiro pares de folhas) e três repetições. Inicialmente, foram verificados os pressupostos da análise de variância por meio dos testes de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (Levene e Bartlett) e independência dos resíduos. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância e, quando observado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Como análise complementar, foi construída a matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares dos macronutrientes avaliados. Como medida complementar de precisão experimental, calculou-se o coeficiente de variação para cada variável avaliada. Todas as análises estatísticas foram realizadas em Python, utilizando os pacotes SciPy, Statsmodels, Pandas e Matplotlib, com apoio metodológico em Banzatto & Kronka (2006) e Montgomery (2019).

Resultados

A análise de variância revelou efeito significativo da posição dos pares de folhas apenas para os teores de Mg (Tabela 1). Para esse nutriente, foi observada diferença estatística entre os pares de folhas ($F = 18,73$; $p = 0,0026$), indicando que a posição foliar influenciou significativamente sua concentração.

Em contrapartida, não foram detectadas diferenças significativas para os teores de N, Ca, P e K ($p > 0,05$). Embora o Ca tenha apresentado tendência à significância ($F = 3,78$; $p = 0,0865$), esse resultado não foi suficiente para rejeitar a hipótese nula ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 1 - Análise de variância dos teores foliares de N, Ca, P, K e Mg em diferentes pares de folhas de *C. arabica*.

Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor
N	Pares de folhas	2	12,8875	6,4437	0,986	0,4264 ns
	Resíduo	6	39,2187	6,5364		
	Total	8	52,1062			
Ca	Pares de folhas	2	14,2875	7,1437	3,784	0,0865 ns
	Resíduo	6	11,3259	1,8877		
	Total	8	25,6134			
P	Pares de folhas	2	0,0007	0,0003	0,004	0,9959 ns
	Resíduo	6	0,4977	0,0829		
	Total	8	0,4984			

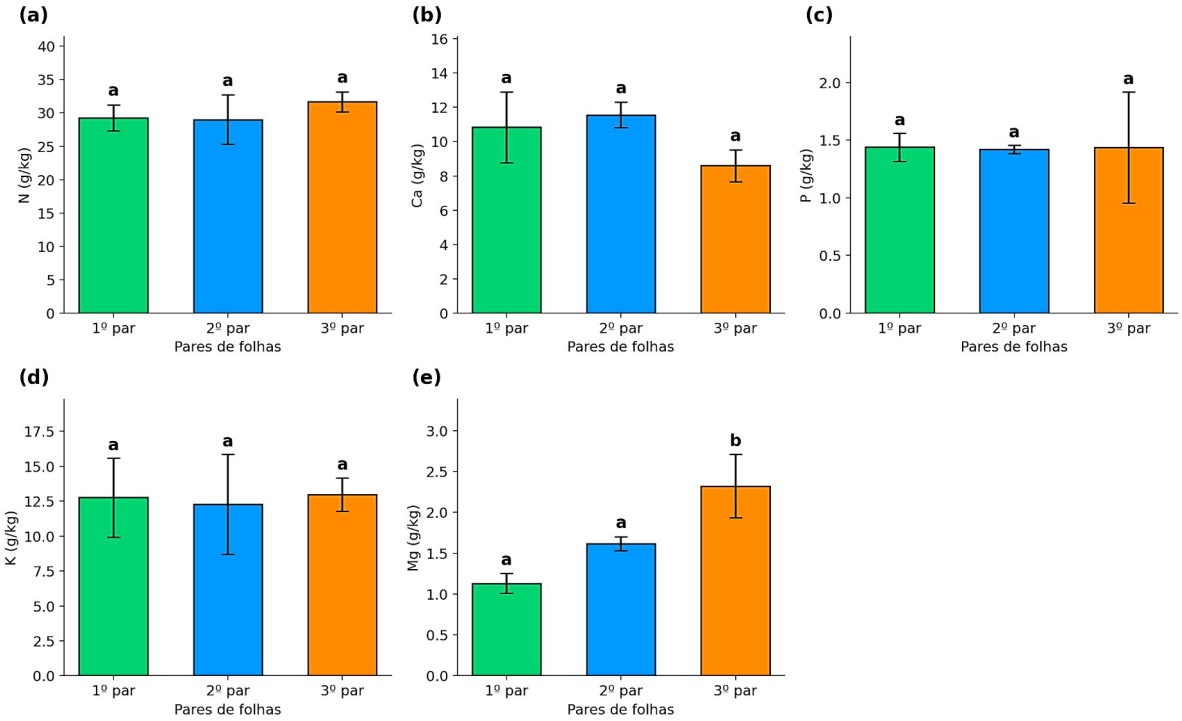
Variável	Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	p-valor
K	Pares de folhas	2	0,7750	0,3875	0,053	0,9491 ns
	Resíduo	6	44,1488	7,3581		
	Total	8	44,9238			
Mg	Pares de folhas	2	2,1476	1,0738	18,726	0,0026 *
	Resíduo	6	0,3441	0,0573		
	Total	8	2,4917			

GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM = quadrado médio; F = valor do teste F. Significância: ns = não significativo (p > 0,05); * = significativo (p < 0,05).

Na comparação das médias (Figura 1), os teores de N (29,02-31,68 g kg^{-1}), Ca (8,60-11,56 g kg^{-1}), P (1,42-1,44 g kg^{-1}) e K (12,27-12,98 g kg^{-1}) não apresentaram diferenças significativas entre os pares de folhas avaliados (Figura 1a-d), corroborando os resultados obtidos na análise de variância.

Em contraste, o Mg apresentou diferença significativa entre as posições foliares (Figura 1e). O maior teor foi observado no terceiro par de folhas (2,32 g kg^{-1}), diferindo significativamente do primeiro (1,13 g kg^{-1}) e do segundo par (1,62 g kg^{-1}), enquanto estes não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O teor de Mg no terceiro par de folhas foi aproximadamente duas vezes superior ao observado no primeiro par e 43% superior ao segundo par.

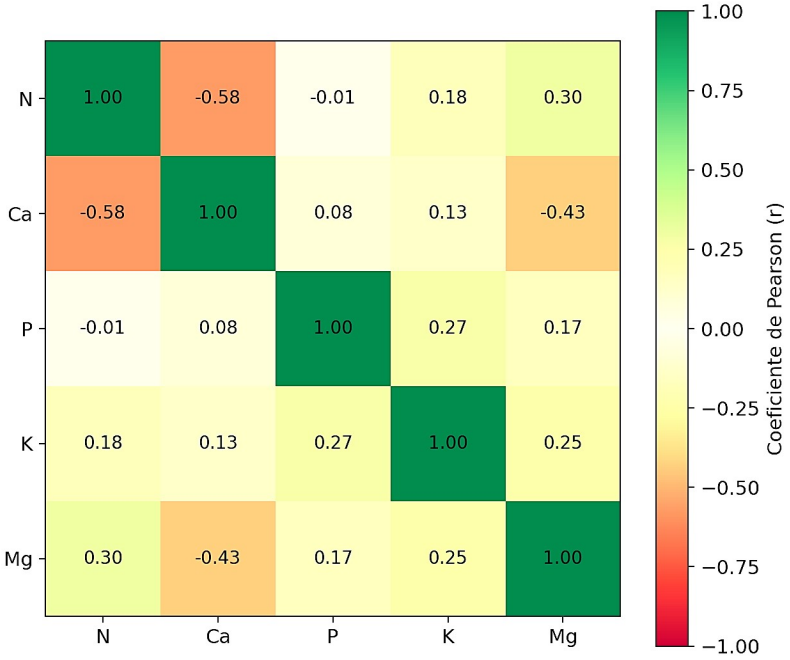
Figura 1 - Teores médios (± desvio-padrão) de N (a), Ca (b), P (c), K (d) e Mg (e) por posição do par de folhas em mudas de cafeeiro arábica. Letras iguais, dentro da mesma variável, indicam equivalência estatística pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: os autores (2026).

Como análise complementar, foi construída a matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares dos cinco macronutrientes avaliados (Figura 2). Observou-se associação negativa moderada entre N e Ca (r = -0,58) e entre Ca e Mg (r = -0,43), enquanto as demais correlações entre pares de nutrientes foram fracas (|r| < 0,30), indicando comportamento relativamente independente entre N, P, K e a variação de Ca e Mg.

Figura 2 - Matriz de correlação de Pearson entre os teores foliares de N, Ca, P, K e Mg em diferentes pares de folhas de *C. arabica*.



Fonte: os autores (2026).

Discussão

Os resultados demonstraram que, entre os macronutrientes avaliados, apenas o Mg apresentou variação significativa em função da posição foliar, com maiores concentrações no terceiro par de folhas. Esse padrão é compatível com sua elevada mobilidade no floema, que permite retranslocação dos tecidos maduros para folhas em expansão, onde a demanda metabólica é maior (Karley & White, 2009; De Bang et al., 2021). Além de compor a molécula de clorofila, o Mg atua na ativação enzimática, na transferência de energia via ATP e no carregamento de fotoassimilados, processos essenciais ao crescimento de tecidos jovens (Kobayashi & Tanoi, 2015; De Bang et al., 2021), o que reforça que a posição foliar pode influenciar a diagnose nutricional desse elemento em *C. arabica*. Os teores de Mg variaram de 1,13 a 2,32 g kg^{-1} e permaneceram abaixo da faixa de suficiência de 2,9–5,1 g kg^{-1} estabelecida por Guimarães et al. (1999) para plantas adultas de cafeeiro. Essa diferença em relação aos valores de referência pode estar associada às características nutricionais de mudas jovens, indicando a necessidade de parâmetros específicos para essa fase de desenvolvimento. A diferença de até 105% entre o primeiro e o terceiro par evidencia que a posição de coleta pode gerar diagnósticos contrastantes, reforçando a necessidade de padronização do protocolo de amostragem para esse nutriente.

Por outro lado, N, P e K apresentaram distribuição relativamente uniforme entre os pares de folhas, sem diferenças estatísticas significativas. Embora móveis no floema, sua redistribuição depende das relações fonte-dreno, do suprimento nutricional e do estádio fisiológico da planta (De Bang et al., 2021). Como as mudas tinham apenas quatro meses e ainda não produziam frutos, o principal dreno competidor por esses nutrientes estava ausente, o que provavelmente contribuiu para a distribuição mais homogênea observada, em contraste com o padrão relatado por Sadeghian-Khalajabadi et al. (2025) em plantas adultas, quando a competição entre frutos e folhas se intensifica. Vale notar que, embora o K não tenha diferido entre as posições, os valores absolutos (12,27-12,98 g kg^{-1}) ficaram 38-42% abaixo da faixa de suficiência de 21-30 g kg^{-1} proposta por Guimarães et al. (1999), sugerindo limitação nutricional geral, independente da posição foliar, o que reforça que ausência de diferença estatística não equivale a adequação nutricional. Para o Ca, observou-se apenas tendência de maiores concentrações nas folhas mais velhas, compatível com sua baixa mobilidade no floema e transporte predominante via xilema, que favorece sua retenção em tecidos maduros (Karley & White, 2009; Ramírez-Builes et al., 2020). Essa relação é corroborada pela correlação negativa moderada entre N e Ca e entre Ca e Mg (Figura 2), sugerindo efeito de diluição/concentração recíproca entre esses elementos.

Portanto, esses achados reforçam que protocolos de amostragem foliar devem considerar a mobilidade específica de cada nutriente, particularmente do Mg, cuja redistribuição pode comprometer a comparabilidade entre amostras coletadas em diferentes posições foliares.

Conclusão

Entre os macronutrientes avaliados, apenas o Mg apresentou variação significativa em função da posição do par de folhas em mudas de *C. arabica*, enquanto N, P, K e Ca mantiveram distribuição relativamente uniforme. Esses resultados confirmam que a elevada mobilidade do Mg deve ser considerada na definição da posição foliar para sua diagnose nutricional, ao passo que os demais macronutrientes são menos influenciados pela posição das folhas nas condições avaliadas. Assim, este trabalho fornece subsídios para o aprimoramento dos protocolos de amostragem foliar, contribuindo para maior confiabilidade da diagnose nutricional e para o manejo racional da adubação em mudas de cafeeiros.

Referências

BANZATTO, D.; KRONKA, S. **Experimentação Agrícola**. 4.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006.

BROSCHAT, T.; ELLIOTT, M. Nutrient Distribution and Sampling for Leaf Analysis in St. Augustinegrass. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.2357-2367, 2004. DOI: 10.1081/LCSS-200030677.

De BANG, T.; HUSTED, S.; LAURSEN, K.; PERSSON, D.; SCHJOERRING, J. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v.229, p.2446-2469, 2021. DOI: 10.1111/nph.17074.

CAMPOS, S. Análise da competitividade do setor cafeeiro brasileiro no mercado internacional. **Economia & Região**, v.10, p.123-143, 2022. DOI: 10.5433/2317-27X.2022v10n1p123.

CLEMENTE, F.; CARVALHO, J.; GUIMARÃES, R.; MENDES, A. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes no cafeeiro em pós-plantio - primeiro ano. **Coffee Science**, v.3, p.47-57, 2008.

GUIMARÃES, P. et al. Cafeeiro. Em: RIBEIRO, A.; GUIMARÃES, P.; ALVAREZ VENEGAS, V. (Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.289-302.

KARLEY, A.; WHITE, P. Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. **Current Opinion in Plant Biology**, v.12, p.291-298, 2009. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.04.013.

KERTON, M.; NEWBURY, H.; HAND, D.; PRITCHARD, J. Accumulation of calcium in the centre of leaves of coriander (*Coriandrum sativum L.*) is due to an uncoupling of water and ion transport. **Journal of Experimental Botany**, v.60, p.227-235, 2009. DOI: 10.1093/jxb/ern279.

KOBAYASHI, N.; TANOI, K. Critical Issues in the Study of Magnesium Transport Systems and Magnesium Deficiency Symptoms in Plants**. International Journal of Molecular Sciences**, v.16, p.23076-23093, 2015. DOI: 10.3390/ijms160923076.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARTINEZ, H.; CLEMENTE, J.; LACERDA, J.; NEVES, Y.; PEDROSA, A. Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, v.61, p.838-848, 2014. DOI: 10.1590/0034-737x201461000009.

MONTGOMERY, D. **Design and Analysis of Experiments**. 10.ed. New York: John Wiley & Sons, 2019.

PRADO, R.; ROZANE, D. Chapter 11 - Leaf analysis as diagnostic tool for balanced fertilization in tropical fruits. Em: SRIVASTAVA, A.; HU, C. (Ed.). **Fruit Crops**. [s.l.] Elsevier, 2020. p.131-143. DOI: 10.1016/B978-0-12-818732-6.00011-3.

RAMÍREZ-BUILES, V.; KÜSTERS, J.; SOUZA, T.; SIMMES, C. Calcium Nutrition in Coffee and Its Influence on Growth, Stress Tolerance, Cations Uptake, and Productivity. **Frontiers in Agronomy**, v.2, p.1-16, 2020. DOI: 10.3389/fagro.2020.590892.

SADEGHIAN-KHALAJABADI, S.; DÍAZ-POVEDA, V.; RENDÓN-SÁENZ, J. Coffee productive branch growth, development and nutrient accumulation from flowering to harvest under Colombian conditions. **Coffee Science**, v.20, p.1-11, 2025. DOI: 10.25186/.v20i.2274.

SERA, G.; VOLSI, B.; MARIUCCI-JÚNIOR, V.; PEREIRA, C.; TELLES, T. Production and trade of specialty coffee in Brazil. **Scientific Reports**, v.15, p.1-15, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-26620-x.

WHITE, P.; BROWN, P. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, v.105, p.1073-1080, 2010. DOI: 10.1093/aob/mcq085.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras (GCUB), à Organização dos Estados Americanos (OEA), à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento da UFES/Alegre e ao Laboratório de Citogenética e Cultura de Tecidos Vegetais da UFES/Alegre pelo apoio financeiro, infraestrutura e recursos fornecidos para a realização deste estudo.