

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de
variáveis edafoclimáticas**

Alvaro Andres Ramirez Palacio

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2021**

Alvaro Andres Ramirez Palacio
Engenheiro Florestal

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Ramirez Palacio, Alvaro Andres

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas / Alvaro Andres Ramirez Palacio. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

112 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Produção de *Eucalyptus* 2. Déficit hídrico 3. Nutrição florestal 4. Diagnose nutricional I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Gloria e Alvaro, pelo incentivo e inspiração.

Toda conquista minha é também de vocês.

A minha companheira, Mariana, pelo apoio, amor e paciência.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade e pelos ensinamentos;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais e a todos os professores e funcionários que contribuíram com a minha formação profissional;

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) do IPEF, e ao seu coordenador, Alexandre de Vicente Ferraz, pelo apoio logístico e financeiro;

Ao Marcos Sandro Felipe (Eucatex), ao Rodolfo Costa (Vallourec) e ao James Stahl (Klabin), pelo suporte nos trabalhos de campo, por disponibilizar as informações necessárias para a condução dos estudos e pela troca de experiências;

Ao Ronaldo Silveira pelo incentivo, os ensinamentos e a amizade. A todos meus amigos da RR Agroflorestal pelos bons momentos que dividimos na minha passagem pela equipe;

Aos estagiários do PTSM, em especial à Vitoria Festucci, pelo imenso apoio nas atividades de campo e de laboratório. Também ao Bruno Horst, ao Rafael Monteleone e à Isabella Barbosa, que tiveram participação importante no projeto;

Aos meus amigos do PTSM, Liamara Masullo, Andressa Ávila, Adam Cruz, Amanda Segtowich, Ivanka Rosada, Antônio Florentino e Maria Isabel Higueta, pela convivência, amizade e companheirismo.

Ao Raúl Poppiel, ao Marcos Busanello, ao Geovanne Malatesta, e aos demais amigos que, de alguma forma, fizeram contribuições ao trabalho.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância”.*

John F. Kennedy

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
Referências	12
2. RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ATRIBUTOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE E O ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES CLONAIIS DE EUCALIPTO	15
Resumo	15
Abstract	15
2.1. Introdução	16
2.2. Material e Métodos	17
2.2.1. Localização das áreas de estudo	17
2.2.2. Seleção das áreas de estudo	20
2.2.3. Caracterização climática	20
2.2.4. Caracterização edáfica	21
2.2.5. Histórico de manejo	22
2.2.6. Avaliações dendrométricas	23
2.2.7. Avaliação do estado nutricional	24
2.2.8. Análises estatísticas e modelagem matemática	25
2.3. Resultados	25
2.3.1. Clima no período de crescimento das árvores e atributos do solo	25
2.3.2. Produtividade e estado nutricional das árvores	27
2.3.3. Relações entre a produtividade, o estado nutricional e o clima	30
2.3.4. Relações entre a produtividade e os atributos do solo	30
2.3.5. Relação entre a produtividade e os teores nutricionais foliares	31
2.3.6. Regressões múltiplas relacionando a produtividade e os teores foliares às variáveis edafoclimáticas	32
2.3.7. Variáveis edafoclimáticas que diferenciam as regiões	33
2.4. Discussão	35
2.4.1. Efeito das condições edafoclimáticas na produtividade	35
2.4.2. Efeito das condições edafoclimáticas na densidade da madeira	38

2.4.3. Estado nutricional das árvores e sua relação com o clima e a produtividade.....	39
2.4.4. Diferenciação dos ambientes de produção	41
2.5. Conclusões.....	42
Referências	42
3. VALORES DE REFERÊNCIA REGIONAIS PARA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO.....	51
Resumo	51
Abstract.....	51
3.1. Introdução.....	52
3.2. Material e Métodos.....	53
3.2.1. Localização e características climáticas	53
3.2.2. Características geológicas e edáficas.....	54
3.2.3. Conformação do banco de dados.....	57
3.2.4. Caracterização das populações	57
3.2.5. Obtenção de faixas de suficiência pela Chance Matemática.....	58
3.2.6. Obtenção de faixas de suficiência pela Linha da Fronteira.....	59
3.2.7. Diagnósticos nutricionais a partir das faixas obtidas.....	60
3.3. Resultados.....	60
3.3.1. Produtividade e teores foliares médios das populações	60
3.3.2. Faixas de suficiência pela Chance Matemática Relativa.....	61
3.3.3. Faixas de suficiência pela Linha da Fronteira	64
3.3.4. Concordância nos diagnósticos nutricionais usando faixas regionais e gerais.....	66
3.3.5. Produtividade por classe de estado nutricional.....	68
3.3.6. Avaliação do estado nutricional das populações em estudo.....	68
3.4. Discussão.....	71
3.4.1. Influência das características edafoclimáticas nos teores foliares, nas faixas de suficiência e níveis críticos.....	71
3.4.2. Influência do método na determinação das faixas de suficiência e níveis críticos.....	73
3.4.3. Avaliação do estado nutricional dos plantios	75
3.5. Conclusões.....	77
Referências	77
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E APLICAÇÕES	85
4.1. Efeitos das condições ambientais	85
4.2. Diagnose nutricional de povoamentos florestais.....	86

Referências.....	86
Apêndice	88

RESUMO

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas

A disponibilidade de água e de nutrientes são os fatores abióticos que mais influenciam o crescimento das plantações florestais em ambientes tropicais. O estudo das interações entre as condições climáticas e os atributos do solo com a nutrição e o crescimento das árvores se torna essencial para a formulação de estratégias de manejo e de fertilização que permitam ganhos em produtividade com retorno financeiro e garantam a sustentabilidade da produção florestal. Os principais objetivos deste estudo foram: (1) identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações monoclonais de eucalipto em um amplo gradiente climático; (2) estabelecer valores de referência para a diagnose nutricional de plantios jovens de eucalipto por estratos climáticos. O estudo foi conduzido em plantações comerciais de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144), localizadas em Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Para atingir o primeiro objetivo, foram selecionadas 14 parcelas por região, representando o gradiente de produtividade observado ao final da primeira rotação ($6,2 \pm 0,5$ anos). Calcularam-se os balanços hídricos sequenciais no período de crescimento dos plantios e avaliaram-se atributos físicos e químicos do solo nas parcelas, como também a produção e densidade da madeira e os teores nutricionais foliares. O incremento médio anual em volume de madeira variou em cinco vezes entre os locais mais ($76,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e menos ($15,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) produtivos, em função, principalmente, das diferenças na precipitação pluvial. A biomassa do tronco e a altura das árvores dominantes também apresentaram correlação positiva com a precipitação. A densidade básica da madeira variou entre $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,55 \text{ g cm}^{-3}$, sendo influenciada positivamente pelo déficit hídrico e pelo espaçamento entre as árvores. Atributos físicos do solo, como o teor de argila e a capacidade de água disponível, influenciaram o crescimento dos plantios em São Paulo. Os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn foram maiores nos locais com condições climáticas mais favoráveis ao crescimento das árvores. Para atingir o segundo objetivo, usaram-se análises foliares e dados de crescimento das árvores de 427 talhões com plantios entre 12 e 24 meses de idade. Obtiveram-se as faixas de suficiência e os níveis críticos dos nutrientes nas folhas para cada região e para o conjunto geral de dados, por meio dos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira. Os valores de referência obtidos foram influenciados pelas condições edafoclimáticas; além disso, verificou-se baixa concordância entre diagnósticos nutricionais usando faixas de suficiência gerais e regionais. Obtiveram-se maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná. Verificou-se uma alta frequência de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, K, Ca, Mg, e S em São Paulo. Estes resultados evidenciam os efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade e o estado nutricional das plantações ao final da rotação. Por outro lado, sugerem que, na fase juvenil do crescimento, os níveis críticos refletem os efeitos dos fatores ambientais que interferem na absorção de nutrientes e no crescimento das árvores, indicando que, para a interpretação de análises foliares de plantios jovens de eucalipto, seja mais adequado o uso de valores de referência obtidos regionalmente.

Palavras-chave: Produção de *Eucalyptus*, Déficit hídrico, Nutrição florestal, Diagnose nutricional

ABSTRACT

Productivity and nutritional status of *Eucalyptus* plantations as a function of edaphoclimatic variables

Water and nutrients supplies are the abiotic factors that most influence the growth of forest plantations in tropical environments. Understanding the interactions between climatic conditions and soil attributes with tree growth and nutrition it becomes essential for the implementation of management and fertilization strategies in order to achieve productivity gains with financial returns, and guarantee a sustainable forest production. The main goals were: (1) to identify and quantify the most limiting environmental factors for wood production and nutritional status of clonal eucalyptus plantations in a broad climatic gradient; (2) to establish standard values for nutritional diagnosis of young eucalyptus plantations for climatic strata. The research was carried out at commercial plantations of *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) located in Minas Gerais, São Paulo and Paraná (Brazil). To achieve the first goal, 14 plots were selected in each region representing the productivity gradient observed at the end of the first rotation ($6,2 \pm 0,5$ years old). The water balance for the growth period of plantations was estimated. Physical and chemical soil attributes, wood density and production and foliar nutrient levels were also evaluated. The wood volume production varied by 5-fold between sites (from $15.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to $76.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), mainly due to differences in rainfall. Stem biomass and mean height of dominant trees also were positively correlated with precipitation. The basic wood density varied between 0.42 g cm^3 and 0.55 g cm^3 , being positively influenced by the water deficit and spacing between trees. The soil clay content and the soil available water capacity influenced the productivity in São Paulo. Foliar contents of N, P, K, Cu and Zn were higher in regions that presented the most favorable climatic conditions for tree growth. For the achievement of the second goal, foliar analyses and trees growth data of 420 field plots with 12 to 24 months-old plantations were used. Sufficiency ranges and critical levels for leaf nutrient diagnosis in each region were determined by the Mathematical Chance and the Boundary-line approaches. Standard values were influenced by edaphoclimatic conditions, and also low concordance between diagnostics using general and regional sufficiency ranges was observed. The highest critical level for B and the lowest critical level for N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn were found in Minas Gerais; while, in São Paulo, were found the highest critical level for N and Mg, and in Paraná, the highest critical level for P, Ca, S and Mn. A high frequency of plots with K and Zn deficiency was observed in Minas Gerais, while in São Paulo the most common deficiencies were observed for P, K, Ca, Mg and S. These results evidence the effects of water stress on productivity and nutritional status of plantations at the end of the first rotation. Also, results suggest that, in the early growth stage, the leaf critical levels reflect the effects of environmental factors that interfere in the nutrient absorption and plant growth, indicating that for the interpretation of foliar analysis of young eucalyptus plantations it is more adequate to use reference values obtained for each specific region.

Keywords: *Eucalyptus* production, Water deficit, Forest nutrition, Nutritional diagnosis

1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor de base florestal tem sido um importante motor de desenvolvimento, uma vez que promove mudanças econômicas locais, oferecendo novas oportunidades de trabalho e gerando renda para a população, bem como contribuindo com a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e na provisão de serviços ecossistêmicos. Em 2019, a área total de plantações florestais no Brasil totalizou 9,0 milhões de hectares. Desse total, a maioria (77%) é representada pelo cultivo de eucalipto, com 6,97 milhões de hectares (IBA, 2021). A maior concentração de florestas plantadas ocorre nas regiões Sul e Sudeste, onde estão localizadas as principais indústrias de celulose, papel, painéis de madeira e siderúrgicas. Somente os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná concentram 49% do total de área plantada com eucalipto no país.

A adoção de boas práticas de manejo, o melhoramento genético e adequadas condições edafoclimáticas para o desenvolvimento das plantações colocam o Brasil no primeiro lugar em produtividade florestal a nível mundial, considerando o volume de madeira produzido por área ao ano e por um dos menores ciclos entre o plantio e a colheita (IBA, 2021). No entanto, em 2019, o Brasil apresentou uma produtividade média de $35,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos plantios de eucalipto, o que representa uma ligeira queda em relação a anos anteriores, que pode estar associada ao efeito das mudanças climáticas, expansão para novas áreas com condições menos favoráveis ao desenvolvimento dos plantios e ao aumento da ocorrência de pragas e de doenças.

O crescimento das árvores é resultante da ação e da interação de fatores climáticos, edáficos e bióticos. O emprego adequado de técnicas de manejo permite maior disponibilização dos recursos e a mitigação dos efeitos de agentes redutores do crescimento, facilitando a obtenção de produtividades mais próximas ao potencial máximo de cada sítio (Sentelhas et al., 2016). A disponibilidade de água e de nutrientes são os fatores abióticos que mais influenciam o crescimento das plantações florestais em ambientes tropicais, onde a radiação e a temperatura são abundantes (Barros e Comerford, 2002; Stape, et al., 2004). Sob condições de déficit hídrico há redução do acúmulo de biomassa, em decorrência do fechamento dos estômatos por longos períodos durante o dia, para evitar a perda de água, o que ocasiona diminuição nas taxas fotossintéticas (Taiz et al., 2016; Saadaoui et al., 2017). O déficit hídrico pode conduzir também a estresses nutricionais, já que em condições de baixa disponibilidade de água no solo são afetados os processos de fluxo e de absorção de nutrientes (Nambiar and Sands, 1993).

Um dos maiores desafios da silvicultura, atualmente, é a seleção de materiais genéticos capazes de se adaptar às mudanças climáticas e a condições prolongadas de estresse hídrico (Gonçalves et al., 2017). Estudos de caso são necessários para aprimorar esses conhecimentos, de modo a realizar uma correta alocação dos materiais genéticos e adotar as melhores práticas de manejo para cada condição ambiental, que ajudem a superar estresses ambientais, permitam ganhos em produtividade e garantam a sustentabilidade da produção florestal.

Nesse contexto, foi realizada neste trabalho uma caracterização ampla de atributos climáticos e edáficos e do crescimento e estado nutricional de plantações comerciais do clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil (clone AEC144), em três regiões consideradas importantes polos florestais, representando um extenso gradiente de condições ambientais. Posteriormente, verificou-se a influência das condições edafoclimáticas regionais na determinação dos níveis críticos e faixas de suficiência para a diagnose nutricional de plantações do mesmo clone em estágios juvenis.

Procurou-se atingir dois objetivos principais: (1) identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações monoclonais de eucalipto nas três regiões de estudo (capítulo 2), (2) estabelecer valores de referência para a interpretação de análises foliares em plantios jovens de eucalipto por estratos climáticos (capítulo 3).

Referências

- BARROS, N. F. de; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. de; MELLO, J. W. V. de; COSTA, L. M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2002. v. 2, p. 487- 592
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. August 2013, p. 6–27, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.
- IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBA 2020**. 2021, 66 p.
- NAMBIAR, E.K.S. Relationships between water, nutrients and productivity in Australian forests: Application to wood production and quality. **Plant and Soil** 168-169: 427-435, 1995.
- SAADAOU, E., BEN YAHIA, K., DHAHRI, S., BEN JAMAA, M.L., KHOUJA, M.L. An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. – **Forestry Studies** Metsanduslikud Uurimused 67, 86–96, 2017.

STAPE, J., BINKLEY, D., RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 17 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.A.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**, 6ª Edição. Porto Alegre, 888 p. 2016.

2. RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ATRIBUTOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE E O ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES CLONAIS DE EUCALIPTO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações clonais de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) em um amplo gradiente climático. O estudo foi conduzido em plantações comerciais localizadas em Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Foram selecionadas 14 parcelas por região representando o gradiente de produtividade observado ao final da primeira rotação ($6,2 \pm 0,5$ anos). Calcularam-se os balanços hídricos sequenciais no período de crescimento dos plantios e avaliaram-se atributos físicos e químicos do solo nas parcelas, como também a produção e densidade da madeira e os teores nutricionais foliares. O incremento médio anual em volume de madeira (IMAV) variou entre 15,3 e 76,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, em função, principalmente, das diferenças na precipitação pluvial. O IMAV diminuiu, em média, 4,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para cada 100 mm ano⁻¹ a menos de chuva. A biomassa do tronco e a altura das árvores dominantes também apresentaram correlação positiva com a precipitação. A densidade básica da madeira variou entre 0,42 g cm⁻³ e 0,55 g cm⁻³, sendo influenciada positivamente pelo déficit hídrico e pelo espaçamento entre as árvores. O teor de argila e a capacidade de água disponível no solo influenciaram o crescimento dos plantios em São Paulo. Os atributos químicos do solo não apresentaram correlações significativas com a produtividade. Os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn foram maiores nos locais com condições climáticas mais favoráveis ao crescimento das árvores. A temperatura do ar, a evapotranspiração potencial e o número de meses com déficit hídrico acima de 10mm foram as variáveis com maior poder discriminatório entre as regiões. Estes resultados evidenciam os efeitos das condições ambientais e do estresse hídrico sobre a produtividade e o estado nutricional das plantações de eucalipto ao final da rotação.

Palavras-chave: Produção de *Eucalyptus*, Déficit hídrico, Produtividade florestal, Nutrição florestal.

ABSTRACT

We aimed to identify and quantify the most limiting environmental factors for wood production and nutritional status of clonal plantations of *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) in a broad climatic gradient in Brazil. The study was carried out at commercial plantations located in Minas Gerais, São Paulo and Paraná. A total of 14 plots were selected in each region representing the productivity gradient observed at the end of the first rotation (6.2 ± 0.5 years old). The sequential water balance for the growth period of plantations was estimated. Physical and chemical soil attributes, wood density and production, and foliar nutrients content were also evaluated. The mean annual increment of wood volume (MAIV) varied between 15.3 and 76.6 m³ ha⁻¹ year⁻¹, mainly due to differences in rainfall. The MAIV decreased by about 4.4 m³ ha⁻¹ year⁻¹ for each 100 mm year⁻¹ decline in rain. The stem biomass and mean height of dominant trees were also positively correlated with precipitation. The basic wood density varied between 0.42 g cm³ and 0.55 g cm³, being positively influenced by the water deficit and spacing between trees. The soil clay content and the soil available water capacity promoted the wood production in São Paulo. The soil chemical attributes did not show significant correlations with productivity. Foliar content of N, P, K, Cu and Zn were higher in regions that presented the most favorable climatic conditions for tree growth. Air temperature, potential evapotranspiration and number of months with water deficit above 10mm were the variables with the greatest discriminatory power between regions. These results evidence the effects of some environmental factors and water stress on productivity and nutritional status of eucalyptus plantations at the end of the first rotation.

Keywords: *Eucalyptus* production, Water deficit, Forest productivity, Forest nutrition

2.1. Introdução

A produtividade das plantações florestais é influenciada por fatores ambientais que condicionam o potencial produtivo dos materiais genéticos (Sentelhas et al., 2016). Assim, para realizar um prognóstico preciso da produtividade esperada de um determinado genótipo de eucalipto em um sítio específico, uma caracterização abrangente do ambiente torna-se indispensável.

Há uma estreita relação entre a produtividade florestal e a disponibilidade de água, sendo o déficit hídrico um dos principais fatores limitantes da produção de madeira de eucalipto (Saadaoui et al., 2017; Gonçalves et al., 2017). Estudos recentes, compreendendo boa parte da geografia brasileira, mostraram um decréscimo na produção de madeira ao final da rotação de $0,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 100 mm ano^{-1} a menos de chuva, e um declínio de $2,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 1°C de acréscimo na temperatura média do ar (Binkley et al., 2020). A qualidade dos sítios florestais, estimada em função da altura média das árvores dominantes, também tem sido correlacionada positivamente com a disponibilidade de água no solo (Scolforo et al., 2020; Gonçalves et al., 1990). Ao contrário, a densidade básica da madeira, tem mostrado uma relação inversamente proporcional à oferta hídrica, em virtude das modificações anatômicas que ocorrem nas fibras da madeira em resposta ao estresse hídrico (Rocha et al., 2020; Fernández et al., 2019; Barbosa et al., 2019).

Os atributos físicos do solo, como o teor de argila, também interferem no crescimento das árvores, por estarem relacionados à quantidade de água disponível no solo (Silva et al., 2020a; Gava e Gonçalves, 2008). Esta, por sua vez, tem efeito direto na nutrição dos plantios, já que a absorção de água pelas raízes é o principal veículo para que as árvores adquiram os nutrientes disponíveis no solo. De modo geral, as plantações de eucalipto no Brasil dependem da adição de fertilizantes para atingir altas produtividades (Barros e Novais, 1995), devido à maior parte dos sítios florestais estarem localizados em solos altamente intemperizados e de baixa fertilidade (Gonçalves, 2002). Por esse mesmo motivo, a ciclagem biogeoquímica dos nutrientes, intensificada a partir do segundo ano após plantio, tem um papel fundamental na manutenção do adequado estado nutricional e no crescimento das florestas (Laclau et al., 2003). Tanto a resposta às fertilizações, como os processos de ciclagem de nutrientes, são afetados diretamente por variáveis edafoclimáticas relacionadas à disponibilidade hídrica (Nambiar, 1995; Comerford, 2005; Laclau et al., 2010; de Melo et al., 2016; Silva et al., 2017).

O estudo da produtividade, das características da madeira e da dinâmica nutricional dos diferentes genótipos de eucalipto em resposta a variações climáticas e atributos do solo é indispensável para o planejamento florestal, por permitir aprimorar a previsão da produção, auxiliar na correta alocação dos materiais genéticos e na implementação das melhores técnicas de manejo nos diversos ambientes de produção, ao mesmo tempo que contribui para uma melhor ocupação de novas áreas de expansão florestal. Nesse contexto, definiram-se os seguintes objetivos:

- i. Estudar o efeito do clima sobre a produtividade, a densidade da madeira e o estado nutricional de plantações monoclonais de *Eucalyptus urophylla*.
- ii. Identificar os atributos físicos e químicos do solo que mais influenciaram a produtividade e o estado nutricional das plantações nas regiões de estudo.
- iii. Estabelecer modelos empíricos das variáveis de produtividade e de teores nutricionais foliares em função de características edafoclimáticas.
- iv. Identificar as variáveis ambientais com maior poder discriminatório entre as regiões.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Localização das áreas de estudo

As áreas de estudo localizam-se nas regiões centro e norte de Minas Gerais (MG), centro-oeste de São Paulo (SP) e norte do Paraná (PR). Compreendem os segmentos latitudinal 17°15' S a 24°42' S e longitudinal 43°64' O a 50°66' O (Figura 1). Correspondem a 42 talhões comerciais com plantios de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144), em idades próximas ao final da rotação (Tabela 1).

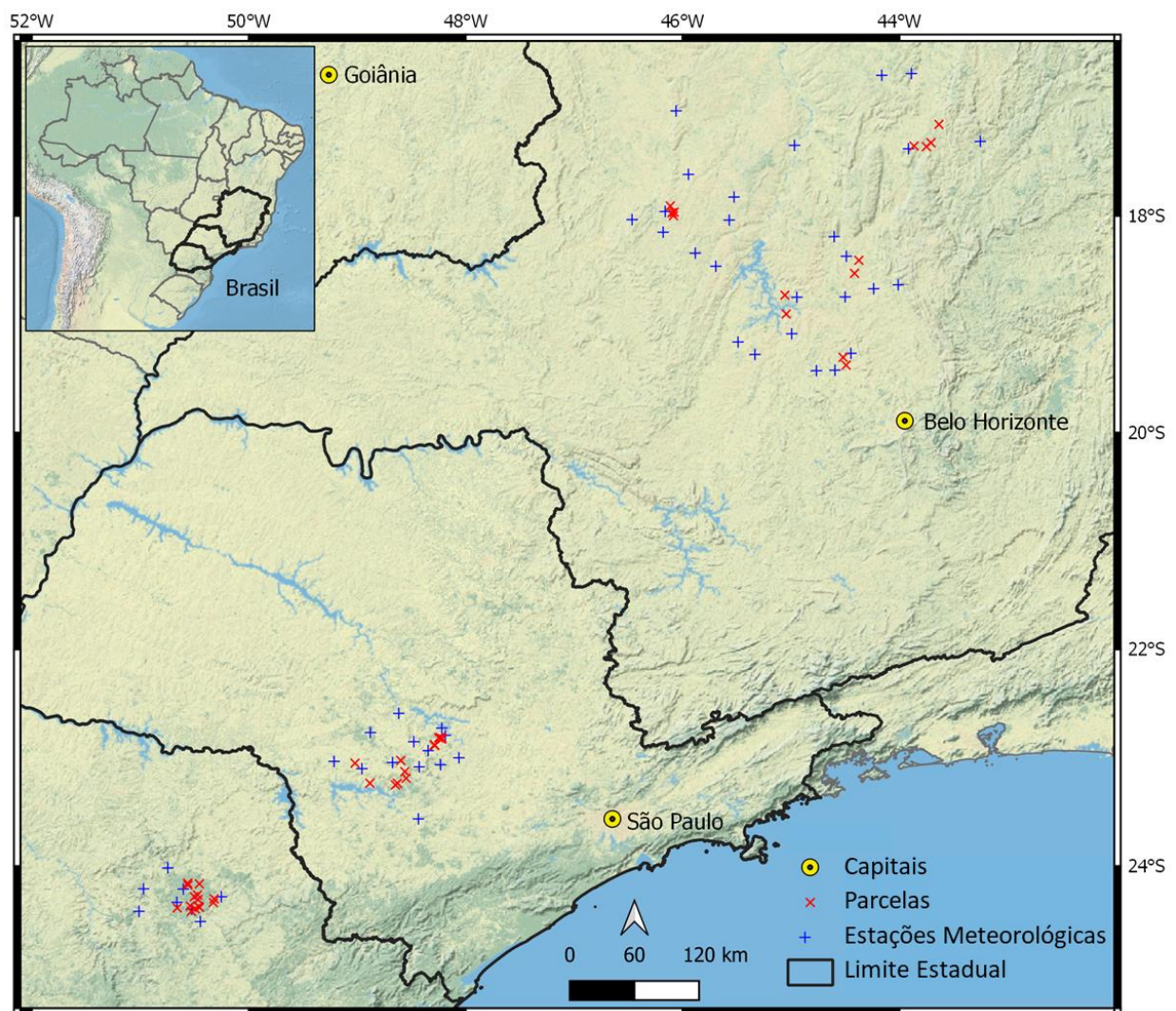


Figura 1. Localização das 42 parcelas experimentais plantadas com o clone AEC144 (*E. urophylla*) e das 48 estações meteorológicas usadas para obter dados de precipitação pluvial.

Tabela 1. Identificação, localização, tipo de clima e de solo das áreas de estudo.

Município	Sítio	Latitude	Longitude	Altitude	Clima ⁽¹⁾	Classe Solo ⁽²⁾	Data Plantio	Data Coleta	Idade	DP ⁽³⁾
				m					anos	
Paraopeba	MG1	-19,377	-44,493	707	Aw	LVd	dez-13	ago-19	5,6	1425
	MG2	-19,306	-44,521	683	Aw	LVd	nov-13	ago-19	5,7	1625
Curvelo	MG3	-18,530	-44,416	676	Aw	LVd	mar-13	ago-19	6,4	1275
	MG4	-18,410	-44,375	656	Aw	LVd	dez-13	ago-19	5,7	1600
Bocaiuva	MG5	-17,355	-43,867	871	Aw	LAd	fev-13	ago-19	6,5	1100
	MG6	-17,361	-43,752	841	Aw	LVdf	fev-13	ago-19	6,5	1075
	MG7	-17,156	-43,637	827	Aw	LVdf	nov-13	ago-19	5,7	1175
João Pinheiro	MG8	-17,325	-43,710	864	Aw	LVdf	mar-13	ago-19	6,4	1175
	MG9	-17,998	-46,086	866	Aw	PVAd	set-12	ago-19	6,9	1125
	MG10	-17,971	-46,099	840	Aw	LAd	out-12	ago-19	6,8	1200
Felixlândia	MG11	-17,909	-46,114	858	Aw	PVAd	out-12	ago-19	6,8	1100
	MG12	-17,966	-46,078	860	Aw	LAd	set-12	ago-19	6,9	1100
	MG13	-18,731	-45,057	661	Aw	LVd	fev-13	ago-19	6,5	1175
Botucatu	MG14	-18,905	-45,045	685	Aw	LVd	dez-12	ago-19	6,6	1275
	Média			778					6,4	1245
Anhembi	SP1	-23,128	-48,562	873	Cwa	PVe	jul-13	mai-19	5,9	1806
	SP2	-23,025	-48,599	854	Cwa	LVAd	jul-13	mai-19	5,9	1703
	SP3	-22,881	-48,287	554	Cwa	PVAd	ago-13	jun-19	5,8	1765
	SP4	-22,887	-48,285	551	Cwa	PVAd	ago-13	jun-19	5,8	1746
	SP5	-22,882	-48,291	619	Cwa	PVAd	mai-13	jun-19	6,1	1807
Avaré	SP6	-22,824	-48,217	598	Aw	LVAd	abr-13	jun-19	6,2	1655
	SP7	-22,827	-48,224	562	Aw	PVAd	abr-13	jun-19	6,2	1765
	SP8	-22,814	-48,235	545	Aw	PVAd	fev-14	jun-19	5,4	1617
	SP9	-22,815	-48,249	507	Aw	PVAd	fev-14	jun-19	5,4	1517
Itatinga	SP10	-23,050	-49,021	826	Cwa	LVd	jun-13	jun-19	6,0	1682
	SP11	-23,235	-48,884	658	Cwa	LVd	abr-14	jun-19	5,2	1513
Telêmaco Borba	SP12	-23,250	-48,648	638	Cwa	LVd	mar-13	jun-19	6,3	1825
	SP13	-23,236	-48,630	630	Cwa	RQo	dez-13	jun-19	5,6	1786
	SP14	-23,189	-48,549	646	Cwa	RQo	dez-13	jun-19	5,5	1516
	Média			647					5,8	1693
Telêmaco Borba	PR1	-24,374	-50,463	818	Cfb	LVd	mai-13	set-19	6,3	1123
	PR2	-24,380	-50,454	811	Cfb	CXbd	mar-14	set-19	5,5	1069
	PR3	-24,367	-50,541	852	Cfb	LVd	dez-12	set-19	6,7	1131
	PR4	-24,417	-50,530	778	Cfb	LVd	out-12	set-19	6,9	1063
	PR5	-24,394	-50,495	811	Cfb	LVd	dez-12	set-19	6,7	1130
	PR6	-24,336	-50,328	1007	Cfb	LVd	ago-13	set-19	6,0	920
	PR7	-24,301	-50,320	973	Cfb	CXbd	out-12	set-19	6,9	972
	PR8	-24,308	-50,469	900	Cfb	LVd	dez-12	set-19	6,7	1028
	PR9	-24,282	-50,503	850	Cfb	CXbd	set-12	set-19	6,9	1206
	PR10	-24,266	-50,473	941	Cfb	LVd	set-12	set-19	6,9	1106
	PR11	-24,164	-50,456	810	Cfb	CXbd	out-12	set-19	6,9	1087
	PR12	-24,386	-50,660	843	Cfb	LVdf	out-13	set-19	5,9	1108
	PR13	-24,175	-50,562	817	Cfb	CXbd	fev-13	set-19	6,6	1062
	PR14	-24,157	-50,565	789	Cfb	CXbd	out-13	set-19	5,9	1088
	Média			857					6,5	1078

(1) Segundo a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2012); (2) LAd = Latossolo Amarelo distrófico, LVd = Latossolo Vermelho distrófico, LVdf = Latossolo Vermelho distroférrico, LVAd = Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, PVAd = Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, PVe = Argissolo Vermelho eutrófico, RQ = Neossolo Quartzarênico órtico, CXbd = Cambissolo Háptico Tb distrófico (Embrapa, 2018); (3) DP = Densidade populacional (No. Árvores ha⁻¹).

2.2.2. Seleção das áreas de estudo

A partir dos resultados do inventário florestal contínuo de empresas florestais, selecionaram-se 14 parcelas por região do clone AEC144, de modo que fosse possível representar o gradiente de produtividade observado em cada região, assim como a amplitude de condições climáticas e de características químicas e físicas do solo. Organizaram-se as parcelas em ordem crescente de incremento médio anual do volume de madeira, escolhendo parcelas de baixa, média e alta produtividade. Selecionaram-se áreas com relevo de plano a suave-ondulado, com solos sem impedimentos físicos para o desenvolvimento das raízes das árvores e com índices de sobrevivência superiores a 90%.

Selecionou-se, para este estudo, o clone AEC144, pois, por possuir alta plasticidade fenotípica e adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas (Binkley et al., 2017; Araújo et al., 2019; Silva et al., 2020), é o material genético mais plantado entre todos os genótipos de eucalipto no Brasil. A escolha de um único clone permite a possibilidade de estudar as variações na produtividade e no estado nutricional das árvores em função de fatores climáticos e edáficos. Dessa forma, evitaram-se interferências que pudessem ser causadas pela variabilidade da resposta de diferentes genótipos ao ambiente. O clone AEC144 é um material de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, registrado pela empresa Aperam Bioenergia Ltda no Registro Nacional de Cultivares com o nº 21874.

2.2.3. Caracterização climática

Entre as três regiões, existe um amplo gradiente climático. As normais climatológicas entre 1960 e 1990 mostram índices pluviométricos variáveis entre 790 mm ano⁻¹, nas áreas mais secas, localizadas ao norte de Minas Gerais, e 1600 mm ano⁻¹, nos locais mais úmidos, localizados no Paraná. De forma geral, a precipitação pluvial aumenta e a temperatura diminui no sentido norte – sul. As temperaturas médias anuais são 22,7, 19,5 e 17,3 °C; as temperaturas médias dos meses mais quentes são 24,4, 22,9 e 21,1°C, enquanto as dos meses mais frios são 19,6, 16,0 e 12,9 °C, em MG, SP e PR, respectivamente. A amplitude térmica ao longo do ano, em MG, é de 13,0 °C, no PR, de 12,1 °C e, em SP, de 11,2 °C.

Para caracterizar o clima ao longo do período de crescimento dos plantios, levantaram-se dados de precipitação e de temperatura média entre 2012 e 2019, para calcular depois os balanços hídricos sequenciais para cada área de estudo, desde o plantio até a data de amostragem das árvores. Criou-se um banco de dados de precipitação pluvial a partir da interpolação dos registros mensais de chuva de 48 estações meteorológicas (26 em MG, 14 em SP e 8 no PR - Figura 1) da Agência Nacional de Águas (ANA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de estações experimentais de instituições de pesquisa (USP, Unesp) e das próprias empresas que participaram do projeto. A seleção das estações teve como base os seguintes critérios: a) menor distância possível em relação às parcelas,

b) localização nas mesmas faixas altimétricas dos talhões de cada região e c) menor número de falhas no período de 2012 a 2019. A interpolação realizou-se pela Ponderação do Inverso da Distância (na sigla em inglês, IDW), no programa *Google Earth Engine*®.

Extraíram-se dados de temperatura média mensal do banco *TerraClimate*, o qual oferece informações climáticas globais com alta resolução espacial ($1/24^\circ$, ~4 km), conforme descrito por Abatzoglou et al. (2018). Essas informações foram validadas através de dados medidos em estações meteorológicas locais. Não se usaram dados de temperatura das estações da rede pública (INMET) por apresentarem muitas falhas no período de interesse.

Finalmente, com os valores mensais de precipitação e de temperatura de cada área, desde o plantio até a data da avaliação de cada parcela, calcularam-se os balanços hídricos sequenciais, seguindo o método de Thornthwaite e Mather (1955), mediante o uso de planilhas eletrônicas construídas por Rolim et al. (1998). Estimaram-se as médias anuais da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real, além do excedente e do déficit hídricos. Calcularam-se o déficit hídrico acumulado e o número de meses com déficit hídrico acima de 10 mm no período de crescimento dos plantios. Além disso, estimou-se o índice de aridez, pelo cociente entre as médias anuais da precipitação e da evapotranspiração potencial.

2.2.4. Caracterização edáfica

Para caracterizar os atributos químicos e físicos do solo, coletaram-se 10 amostras simples de terra, por parcela, nas entrelinhas de plantio, nas camadas 0-20 e 20-40 cm de profundidade, as quais foram misturadas e homogeneizadas para formar uma amostra composta por camada. Nas amostras, determinaram-se, por meio dos métodos descritos por Raij et al. (2001), os atributos químicos: pH em CaCl_2 0,01 mol l⁻¹, Al, Ca, Mg e K trocáveis, matéria orgânica e P disponível (resina). Como atributos físicos do solo, determinaram-se a granulometria (frações argila, silte e areia) e a capacidade de água disponível (CAD). Obtiveram-se os teores de argila, por sedimentação, usando o densímetro de Bouyoucos; e os teores de areia, mediante peneiramento. Os teores de silte foram calculados pela expressão: 100 - (argila + areia).

Estimou-se a CAD mediante a multiplicação da água disponível pela profundidade efetiva do solo (Equação 1). A água disponível foi calculada de acordo com Gava e Gonçalves (2008), por meio de modelo que usa o teor de argila do solo como variável preditora (Equação 2). A profundidade efetiva variou em função do tipo de solo, assumindo o valor de 2,0 m para os Latossolos e para os Neossolos Quartzarênicos, 1,5 m para os Argissolos e 1,0 m para os Cambissolos. Os valores de CAD foram usados para calcular os balanços hídricos nas parcelas, como também no estudo das relações entre as variáveis edáficas e a produtividade.

$$CAD = ADS \times PE \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

CAD = Capacidade de água disponível no solo em mm;

ADS = Água disponível no solo em mm m⁻³;

PE = Profundidade efetiva em m.

$$ADS = 41,45 \text{ Exp } (0,0020 \times \text{Argila}) \quad (\text{Eq.2})$$

Em que:

Argila = teor de argila em g kg⁻¹

2.2.5. Histórico de manejo

As plantações em estudo foram conduzidas com alto padrão tecnológico. De forma geral, os tratamentos silviculturais consistiram em: controles de formigas cortadeiras, antes do plantio e ao longo do primeiro ano após plantio, com monitoramentos periódicos nos anos subsequentes; dessecação, com herbicida, de ervas daninhas em área total antes da implantação, e controles periódicos da mato-competição até um ano após o plantio. Além disso, antes da implantação, fez-se a calagem, distribuindo, sem incorporação, o calcário a lanço em área total, com o intuito de fornecer Ca e Mg às plantas. Em MG, além do calcário, aplicou-se gesso agrícola no solo. O preparo se realizou seguindo os princípios do cultivo mínimo (Gonçalves, 2002). As profundidades de subsolagem variaram entre 30 e 60 cm; utilizando-se as maiores profundidades nos solos mais argilosos.

Durante o preparo do solo, realizou-se a adubação de base, priorizando o fornecimento de nutrientes menos móveis no solo (P, Cu e Zn); aplicaram-se, também, pequenas doses de N, K, S e B. Em MG e SP, a adubação de base foi aplicada em filete contínuo no sulco de plantio, com o adubo localizando-se entre 25 e 35 cm de profundidade. Já no PR, realizou-se a adubação de base em duas covetas laterais por muda. Na média, realizaram-se duas adubações de cobertura até os 12 meses de idade, fornecendo N, K, S e B. Nas adubações de cobertura, aplicaram-se os fertilizantes sobre o solo nas entrelinhas de plantio. As quantidades dos nutrientes aplicadas variaram em função da fertilidade do solo, avaliada antes da implantação (Tabela 2). Em MG, os plantios receberam de uma a duas pulverizações foliares com boro entre 12 e 36 meses de idade.

Tabela 2. Doses mínima, média e máxima dos nutrientes aplicadas nas adubações nas três regiões.

DOSE	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
----- kg ha ⁻¹ -----									
MG									
Mínima	120	97	217	685	225	94	6,4	1,4	2,2
Média	156	108	241	743	243	111	7,8	1,6	2,4
Máxima	190	122	277	890	270	170	8,4	2,3	2,7
SP									
Mínima	88	90	191	315	150	58	3,7	1,5	1,5
Média	92	97	292	556	239	72	5,3	1,7	2,1
Máxima	105	119	396	735	350	126	6,6	2,0	3,0
PR									
Mínima	40	90	110	330	180	n.i.	1,5	n.i.	n.i.
Média	55	104	126	330	180	n.i.	2,1	n.i.	n.i.
Máxima	65	120	140	330	180	n.i.	2,5	n.i.	n.i.

n.i. = não informado.

2.2.6. Avaliações dendrométricas

Em cada parcela, mediram-se os diâmetros de todas as árvores e as alturas das árvores localizadas em duas diagonais, que correspondiam a, aproximadamente, 25% dos indivíduos da parcela. Mediram-se as alturas das quatro árvores com maior diâmetro, para calcular a altura dominante da parcela. Foram abatidas duas árvores médias, nas quais foram mensuradas as alturas total e comercial, até diâmetro mínimo de 5 cm. Realizou-se a cubagem das árvores, medindo os diâmetros a cada dois metros, até a altura comercial. O volume sólido de cada árvore abatida foi determinado com a fórmula de Smalian (Batista et al., 2014). Em cada região, ajustou-se uma equação hipsométrica, seguindo modelo proposto por Scolforo (1998), para estimar a altura das árvores não medidas (Equação 3).

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H_{dom}) + \beta_2 \ln\left(\frac{Dg}{DAP}\right) + \beta_3 \left(\frac{1}{I \times DAP}\right) + \beta_4 \left(\frac{1}{DAP}\right) + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.3})$$

Em que:

Ln = logaritmo neperiano;

H = altura total da árvore em m;

H_{dom} = altura das árvores dominantes em m;

DAP = diâmetro a 1,30 m do solo em cm;

Dg = diâmetro médio quadrático em cm;

I = idade em anos;

β_i = parâmetros do modelo a estimar;ε_i = erro da estimativa.

Para determinar o volume de madeira do povoamento, ajustou-se uma equação de volume para cada região, seguindo o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) (Equação 4).

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.4})$$

Em que:

\ln = logaritmo neperiano;

V = volume das árvores em m^3 ;

H = altura total da árvore em m;

DAP = diâmetro a 1,30 m do solo em cm;

β_i = parâmetros do modelo a estimar;

ε_i = erro da estimativa.

Além de determinar-se a massa fresca do tronco, coletaram-se seis amostras do caule por árvore, a fim de se estimarem o teor de umidade e a massa seca do tronco. Também, foram coletadas seis amostras de lenho para determinar a densidade básica da madeira. Ao todo, cortaram-se 12 discos por árvore, com espessura aproximada de 3 cm, localizados no tronco da seguinte maneira: dois discos na base da árvore, dois discos a 1,3 m da base (DAP), dois discos a 25%, dois discos a 50%, dois discos a 75% e dois discos a 100% da altura comercial. Seis discos (1 de cada posição) foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingir massa constante, a fim de determinar a massa seca do caule.

Determinou-se a densidade básica da madeira (DBM) pelo método da balança hidrostática (ABNT, 2003). Dos seis discos restantes de cada árvore, retirou-se porção equivalente a 25% da área de cada disco. As amostras foram imersas em água até atingir a saturação, quando se determinaram sua massa saturada e imersa. Posteriormente, secaram-se as amostras em estufa de circulação forçada de ar a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até a massa constante. A densidade básica de cada disco foi calculada pela relação entre a massa seca e o volume saturado da amostra. Calculou-se a DBM de cada árvore através da média da densidade dos seis discos.

2.2.7. Avaliação do estado nutricional

Em cada árvore abatida, coletaram-se 100 folhas recém-maduras na região de transição entre o terço médio e o superior da copa, para determinar os teores de macro e de micronutrientes. As folhas foram secas a 65°C até a massa constante e, posteriormente, moídas e peneiradas numa malha de 0,595 mm. O teor de N foi determinado pelo método microKjeldahl (digestão sulfúrica); K , Ca , Mg , Cu , Zn , Fe e Mn , por espectrofotometria de absorção atômica (digestão nítrico-perclórica); S , por turbidimetria (digestão nítrico-perclórica); P , por colorimetria do metavanadato (digestão nítrico-perclórica) e B , por colorimetria de azometina (decomposição por incineração), de acordo com os métodos descritos por Malavolta et al. (1997).

2.2.8. Análises estatísticas e modelagem matemática

Usando o procedimento de modelos lineares generalizados (GLM), do software SAS® *On Demand* (SAS, 2016), realizaram-se análises de variância das variáveis relacionadas à produção de madeira e ao estado nutricional das árvores. Utilizou-se o teste da diferença mínima significativa (na sigla em inglês, LSD), a um nível de significância de 0,05, para verificar as diferenças entre as médias das populações das três regiões.

Para investigar a influência dos fatores edafoclimáticos sobre a produtividade e o estado nutricional das árvores, primeiramente, foram realizadas análises de correlação simples. Posteriormente, realizaram-se análises de regressão múltipla, tanto em nível geral (analisando todo o conjunto de dados) quanto regional, considerando as variáveis de solo e de clima junto à idade e à densidade populacional como preditoras, e o incremento médio anual do volume do tronco (IMAV), a altura média das árvores dominantes (Hdom), a densidade básica da madeira (DBM) e o conteúdo de N, de P e de K nas folhas como variáveis-resposta. Foi usado o procedimento *stepwise* do SAS para selecionar as variáveis significativas, usando um valor $p \leq 0,10$ para a permanência da variável no modelo. Foi testada a multicolinearidade entre as variáveis selecionadas por meio do fator de inflação de variância (FIV), retirando, do modelo, variáveis com $FIV > 10$, pois, acima desse valor, a colinearidade é considerada alta (Cohen et al., 1983). As pressuposições de normalidade, de homogeneidade e de independência foram verificadas por meio de análises gráficas dos resíduos.

Para demonstrar que as regiões selecionadas apresentam características ambientais contrastantes e para identificar as variáveis mais importantes na diferenciação das regiões, realizou-se análise discriminante canônica, testando-se todas as combinações possíveis de variáveis climáticas e edáficas na separação dos grupos, por meio dos procedimentos *stepdisc* e *candisc* do SAS. A fim de representar, graficamente a separação das regiões, calcularam-se as duas principais funções discriminantes canônicas (FDC1 e FDC2) para os 42 sítios. Tais funções correspondem às combinações lineares que permitem obter a razão F máxima possível numa análise de variância de um fator para a variação dentro e entre grupos (Manley, 2008).

2.3. Resultados

2.3.1. Clima no período de crescimento das árvores e atributos do solo

Os maiores valores de temperatura e, conseqüentemente, de evapotranspiração potencial e de déficit hídrico, foram identificados nos sítios florestais localizados em MG (Tabelas 3 e A1). Englobando-se todos os locais, a precipitação pluvial variou entre 756 e 1658 mm ano⁻¹. Na média, nas áreas de MG, o volume de chuva representou apenas 66% do de SP e 63% do volume do PR. Também em MG, a precipitação média anual entre locais variou mais do que nas demais regiões. Nessa região,

observou-se a amplitude média de 375 mm ano⁻¹, enquanto, em SP, de 258 mm ano⁻¹ e, no PR, de 194 mm ano⁻¹. Na média, em MG, o déficit hídrico anual foi 12 vezes maior do que o de SP e 34 vezes superior ao do PR. De acordo com os índices de aridez, no PR e em SP, a precipitação média anual foi maior que a evapotranspiração potencial; já, em MG, ocorreu o contrário.

Observou-se maior frequência de solos arenosos nas parcelas de SP (Tabelas 4 e A2). No PR, predominaram os solos de textura média e, em MG, os solos argilosos a muito argilosos. A maior amplitude de textura dos solos encontrou-se nas parcelas de MG, com solos que apresentam de 11,3 a 82,1% de argila. Os teores de matéria orgânica do solo (MOS) em MG e no PR apresentaram, em média, valores superiores aos de SP. Destaca-se que o menor valor de MOS encontrado no PR (27,3 g dm⁻³) é maior que a média de MOS das parcelas de SP (25,9 g dm⁻³), região em que, de modo geral, a variabilidade na fertilidade do solo se apresentou maior, assim como onde se identificaram os maiores valores de Ca, Mg e K.

Tabela 3. Valores médios, máximos e mínimos e coeficiente de variação (CV) entre os sítios de cada região para as variáveis climáticas ⁽¹⁾.

	T	PP	ETP	ETR	EXC	DEF	DEFacum	MDEF10	IA
	°C	----- mm -----							
MG									
Mínimo	23,5	756	1219	725	20	329	1867	39	0,6
Média	24,2	967	1329	891	98	438	2796	53	0,7
Máximo	24,9	1131	1426	1001	238	559	3326	60	0,9
CV (%)	1,7	15,2	4,4	11,5	90,5	20,0	18,8	12,1	14,3
SP									
Mínimo	20,0	1344	917	897	405	20	119	3	1,3
Média	21,2	1475	1001	964	534	37	218	11	1,5
Máximo	21,7	1602	1031	1004	714	62	360	17	1,7
CV (%)	2,8	6,8	3,7	3,1	18,5	44,4	46,5	44,9	9,5
PR									
Mínimo	18,2	1464	827	819	580	8	51	1	1,6
Média	18,8	1540	877	865	687	13	83	5	1,8
Máximo	19,2	1658	918	904	772	20	136	10	1,8
CV (%)	1,6	3,4	3,2	3,1	7,6	27,6	28,7	54,9	4,4

⁽¹⁾ T = temperatura média anual, PP = Precipitação pluvial média anual, ETP = Evapotranspiração potencial média anual, ETR = Evapotranspiração real média anual, EXC = Excedente hídrico médio anual, DEF = Déficit hídrico médio anual, DEFacum = Déficit hídrico acumulado desde o plantio até a colheita, MDEF10 = Número de meses com déficit hídrico acima de 10 mm desde o plantio, IA = índice de Aridez.

Tabela 4. Valores médios, máximos e mínimos e coeficiente de variação (CV) entre os sítios de cada região para as variáveis edáficas na camada 0-20 cm de profundidade do solo.

	Argila	Silte	Areia	CAD	pH ⁽¹⁾	MOS ⁽²⁾	P ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	K ⁽⁴⁾	CTCe
	----- g kg ⁻¹ -----			mm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmolc dm ⁻³ -----				
MG												
Mínimo	113	22	57	92	3,8	19,9	5,4	5,7	0,3	0,4	0,5	6,9
Média	547	131	322	284	4,0	36,5	6,6	12,1	2,3	1,8	0,9	17,1
Máximo	821	289	858	439	4,3	58,1	8,7	16,2	6,0	5,1	1,9	24,2
CV (%)	51,3	65,0	104,8	47,2	3,8	29,8	15,5	29,6	72,1	84,3	46,2	28,9
SP												
Mínimo	38	15	476	67	3,6	17,3	3,6	0,3	1,1	0,5	0,4	2,3
Média	144	49	809	109	4,2	25,9	5,2	6,2	10,2	5,7	1,3	23,4
Máximo	420	130	937	194	5,2	38,8	9,8	11,4	49,7	35,8	2,9	90,4
CV (%)	76,7	69,5	17,6	32,1	10,7	24,1	33,9	59,8	135,4	159,6	57,9	90,5
PR												
Mínimo	141	19	112	55	3,6	27,3	6,7	12,7	1,2	0,2	0,5	14,6
Média	302	171	527	125	3,8	36,6	9,4	21,1	3,4	1,3	0,8	26,7
Máximo	556	581	781	256	4,0	50,4	22,1	35,2	6,7	4,7	2,1	42,3
CV (%)	33,3	96,5	42,1	44,7	3,0	18,6	41,0	42,0	50,5	92,3	50,7	35,4

⁽¹⁾ CaCl₂ 0,01 mol l⁻¹; ⁽²⁾ Oxidação via úmida; ⁽³⁾ Extraído com resina trocadora de íons; ⁽⁴⁾ Extraído com KCl 1 mol l⁻¹.

2.3.2. Produtividade e estado nutricional das árvores

De modo geral, os dados permitiram observar grande amplitude nas variáveis relacionadas à produção de madeira (Tabela 5, Figura 2). Em SP, constatarem-se os maiores valores de IMAV (76,5 m³ ha⁻¹ ano⁻¹) e de IMAB (36,2 t ha⁻¹ ano⁻¹), enquanto os menores em MG (15,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 7,6 t ha⁻¹ ano⁻¹). Nesta região, verificou-se a maior variação da produtividade, e no PR, a menor. Além disso, observaram-se diferenças significativas (p<0,05) de IMAV e de IMAB entre MG e as demais regiões. Ainda, a altura das árvores dominantes (Hdom), relacionada à qualidade do sítio, foi diferente nas três regiões, maior no PR e menor em MG. Também se notaram diferenças na densidade básica da madeira (DBM) entre as três regiões, cujos valores mínimo (0,42 g cm⁻³) e máximo (0,55 g cm⁻³) ocorreram em SP e em MG, respectivamente. Como esperado, as variáveis diâmetro à altura do peito (DAP), altura (H) e volume médio individual (Vmi) apresentaram maiores valores no PR, visto que, em comparação às demais regiões, esta apresenta menor densidade populacional média (Tabela 5).

Verificaram-se diferenças entre as regiões nos teores foliares de N, P, K, B, Cu e Zn. No PR, notaram-se os maiores teores médios desses nutrientes, excetuando-se B, maior em MG, onde se aplicam altas doses deste elemento, por meio de adubações, via solo e folhas. Não se observaram, ao nível de 5% de probabilidade, diferenças nos teores de Ca, Mg, S e Mn entre as regiões (Tabelas 6 e A4, Figura 3).

Tabela 5. Valores médios, máximos e mínimos e coeficiente de variação (CV) em cada região, para as variáveis dendrométricas e de produtividade de madeira ⁽¹⁾.

	DAP	H	Vmi	Hdom	DBM	IMAB	IMAV
	cm	m	m ³	m	g cm ⁻³	t ha ⁻¹ ano ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
MG							
Mínimo	11,2	16,7	0,074	17,9	0,454	7,6	15,3
Média	13,9	22,9	0,173	24,7	0,495	16,6	32,6
Máximo	17,0	29,4	0,327	32,3	0,547	29,8	52,5
CV (%)	13,7	18,8	47,7	19,2	5,0	39,7	38,7
SP							
Mínimo	12,8	21,6	0,150	23,8	0,418	19,8	46,5
Média	14,6	24,0	0,198	27,6	0,438	25,5	58,6
Máximo	16,2	26,6	0,261	30,2	0,471	33,2	76,5
CV (%)	5,4	6,4	16,9	6,4	3,4	14,9	14,4
PR							
Mínimo	16,6	25,4	0,295	28,3	0,437	18,0	40,1
Média	17,4	27,5	0,343	31,0	0,473	24,3	53,7
Máximo	18,7	30,8	0,419	33,3	0,525	29,4	64,3
CV (%)	3,5	6,1	11,3	4,3	4,5	13,2	12,6

(1) DAP = Diâmetro médio à altura de 1,3 m; H = Altura média da parcela; Vmi = Volume individual médio; Hdom = Altura média das árvores dominantes; DBM = densidade básica da madeira; IMAB = Incremento médio anual em biomassa do tronco; IMAV = Incremento médio anual em volume do tronco.

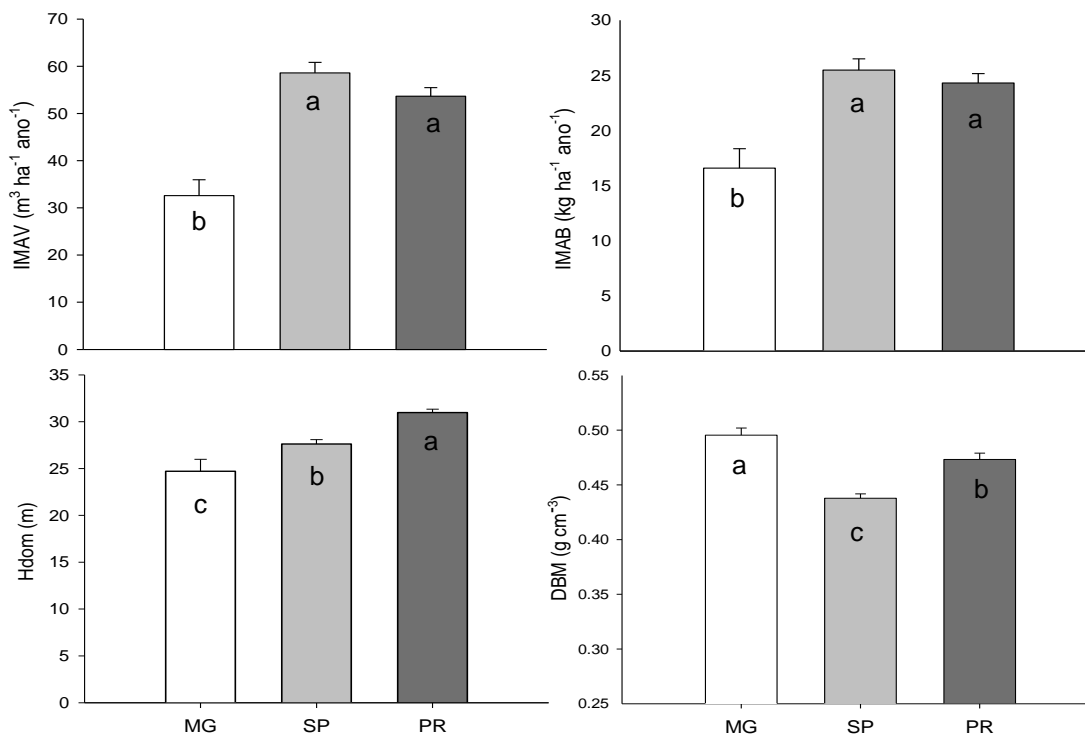
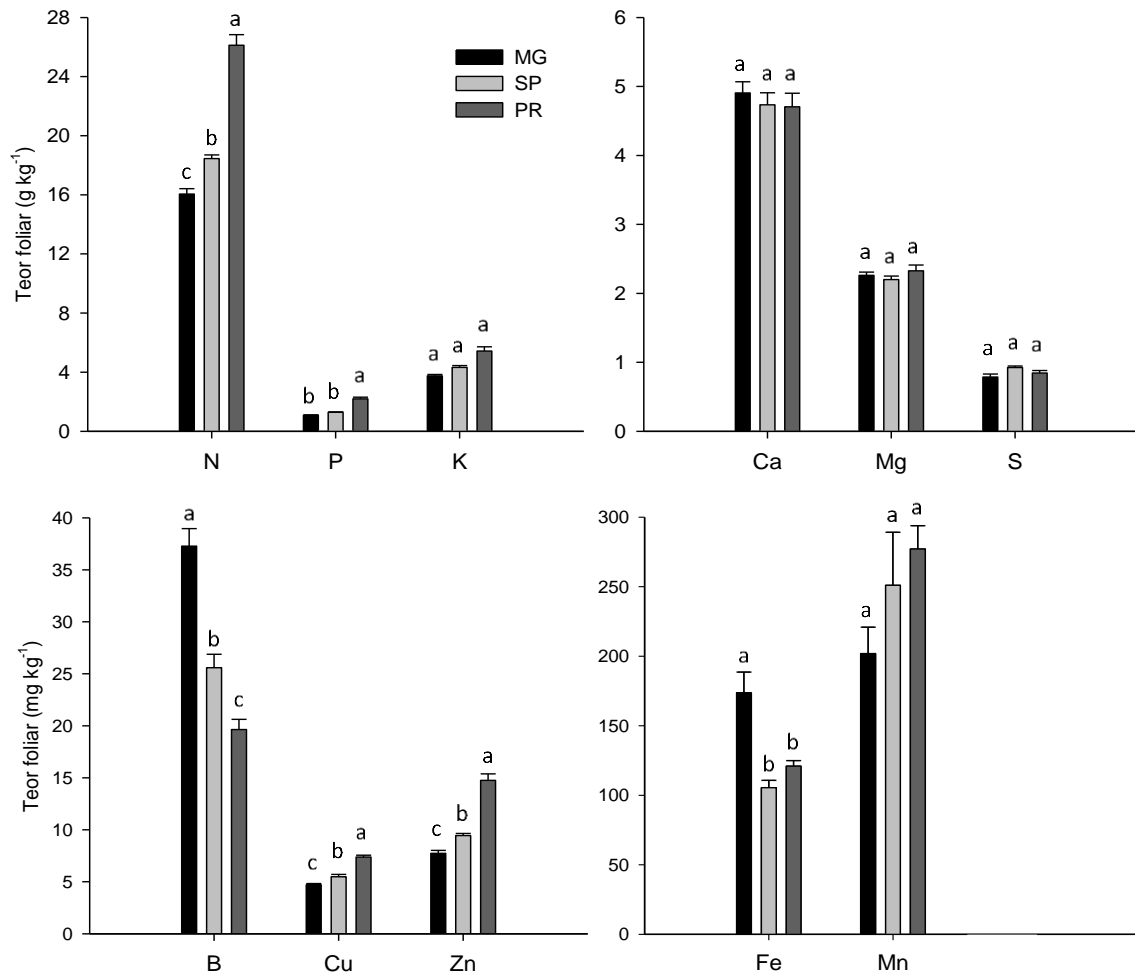


Figura 2. Valores médios e erro padrão (linhas verticais nas barras) de IMA em volume de madeira (IMAV), IMA em biomassa do tronco (IMAB), altura média das árvores dominantes (Hdom) e densidade básica da madeira (DBM) nas regiões de MG, de SP e do PR. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste LSD ($p < 0,05$). $n = 14$ parcelas por região.

Tabela 6. Valores médios, máximos e mínimos e coeficiente de variação (CV) entre os sítios de cada região para os teores de nutrientes nas folhas.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn	Fe	Mn	
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
	MG											
Mínimo	12,9	0,8	3,1	3,5	1,9	0,6	22,3	3,5	5,3	102	72	
Média	16,1	1,1	3,8	4,9	2,3	0,8	37,3	4,7	7,7	174	202	
Máximo	18,1	1,3	4,3	6,0	2,6	1,2	51,1	5,9	10,1	313	363	
CV (%)	11,6	13,6	11,1	14,4	9,8	28,6	21,2	12,8	19,3	42,8	48,7	
	SP											
Mínimo	17,0	1,0	3,6	3,4	1,8	0,8	15,7	3,8	8,0	84	71	
Média	18,4	1,3	4,4	4,7	2,2	0,9	25,4	5,5	9,5	106	251	
Máximo	19,5	1,5	5,1	6,3	2,5	1,1	34,3	8,4	10,7	143	770	
CV (%)	3,9	11,9	9,6	17,1	9,9	9,9	19,4	19,6	9,2	16,6	81,3	
	PR											
Mínimo	19,6	1,4	3,3	3,6	1,7	0,7	15,2	6,1	12,2	96	95	
Média	26,1	2,2	5,4	4,7	2,3	0,8	19,6	7,4	14,8	121	277	
Máximo	31,9	3,2	7,9	6,9	2,9	1,2	30,4	8,6	18,7	162	396	
CV (%)	12,3	21,4	24,4	18,8	16,3	16,7	22,2	9,0	14,8	15,4	29,1	

Figura 3. Valores médios e erro padrão (linhas verticais sobre as barras) dos teores de nutrientes nas folhas nas regiões MG, SP e PR. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste LSD ($p < 0,05$). $n = 14$ parcelas por região.

2.3.3. Relações entre a produtividade, o estado nutricional e o clima

IMAV, IMAB e Hdom apresentaram correlação significativa com as variáveis climáticas, exceto com a ETR (Tabela 7). Essa relação foi positiva com as variáveis PP, EXC e IA e, negativa, com T, ETP, DEF, DEFacum e MDEF10, indicando que, em lugares com maior oferta hídrica, a produtividade tendeu a ser maior. Comportamento contrário observou-se para a DBM, que apresentou maiores valores nas áreas com maior déficit hídrico (Tabela 7). Os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn apresentaram correlações negativas com a temperatura, com a evapotranspiração potencial e com o déficit hídrico, enquanto correlações positivas com as variáveis PP, EXC e IA. Essas relações foram mais fortes para os elementos N, Cu e Zn; já Ca, Mg e Mn não apresentaram correlações significativas com nenhuma variável climática (Tabela 7).

Tabela 7. Correlação das variáveis de produtividade e dos teores foliares nutricionais com as variáveis climáticas obtidas para o período de crescimento dos plantios, considerando todo o conjunto de dados.

Variáveis	PP	T	ETP	ETR	EXC	DEF	DEFacum	MDEF10	IA
Produtividade									
IMAV	0,83*	-0,62*	-0,68*	0,27	0,76*	-0,79*	-0,77*	-0,78*	0,75*
IMAB	0,77*	-0,54*	-0,58*	0,29	0,68*	-0,70*	-0,67*	-0,69*	0,68*
Hdom	0,74*	-0,64*	-0,60*	0,02	0,73*	-0,63*	-0,58*	-0,62*	0,70*
DBM	-0,56*	0,34*	0,45*	-0,35*	-0,47*	0,58*	0,60*	0,57*	-0,47*
Nutricionais									
N	0,66*	-0,80*	-0,71*	-0,20	0,71*	-0,66*	-0,65*	-0,67*	0,74*
P	0,57*	-0,74*	-0,66*	-0,26	0,64*	-0,59*	-0,58*	-0,60*	0,67*
K	0,45*	-0,58*	-0,54*	-0,18	0,50*	-0,50*	-0,49*	-0,50*	0,52*
Ca	-0,12	0,07	0,07	-0,07	-0,10	0,10	0,07	0,08	-0,08
Mg	0,13	-0,11	-0,06	0,01	0,13	-0,06	-0,05	-0,07	0,13
S	0,30	-0,14	-0,15	0,52*	0,18	-0,34*	-0,37*	-0,33*	0,22
B	-0,63*	0,79*	0,78*	0,23	-0,69*	0,72*	0,73*	0,73*	-0,73*
Cu	0,70*	-0,80*	-0,72*	-0,21	0,76*	-0,66*	-0,65*	-0,69*	0,77*
Fe	-0,50*	0,37*	0,40*	0,10	-0,51*	0,38*	0,37*	0,46*	-0,46*
Mn	0,05	-0,16	-0,17	-0,04	0,06	-0,16	-0,17	-0,13	0,11
Zn	0,65*	-0,81*	-0,72*	-0,20	0,71*	-0,67*	-0,67*	-0,68*	0,74*

* Correlação significativa ($p < 0,05$).

2.3.4. Relações entre a produtividade e os atributos do solo

Observaram-se poucas correlações significativas entre os atributos do solo e as variáveis relacionadas à produção de madeira (Figura 4). Nas correlações apresentadas, consideraram-se, unicamente, os atributos do solo determinados na camada 0-20 cm, pois, ao levar em conta a camada 20-40 cm, ou a média entre as duas camadas (0-40 cm), as correlações mostraram-se ainda menores (resultados não apresentados). Em SP, o IMAV e o IMAB apresentam correlação positiva com o teor de argila e com a CAD. Em MG, as correlações entre IMAV, IMAB, Hdom e CAD, teor de argila, MO

e Al trocável foram negativas. A DBM não apresentou correlações significativas com nenhum atributo do solo, dado que se evidencia pela baixa dispersão dos pontos que representam os índices de correlação (Figura 4). As variáveis IMAV e IMAB correlacionaram-se fortemente ($r = 0,97$). Motivo pelo qual as correlações dessas variáveis com as edáficas e as climáticas exibiram comportamento muito semelhante (Figura 4).

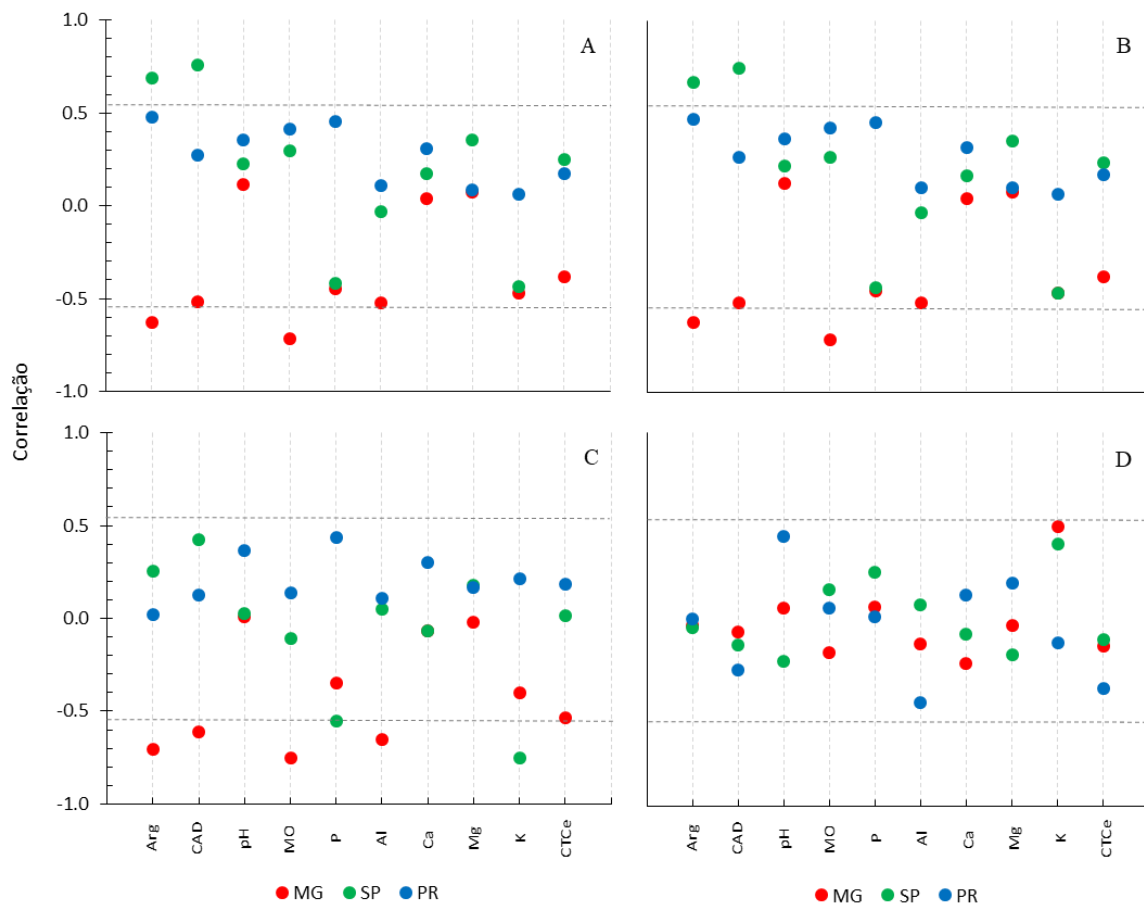


Figura 4. Correlação de Pearson, por região, entre as variáveis de produtividade: IMAV (A), IMAB (B), Hdom (C) e DBM (D) e os atributos do solo: teor de argila (Arg), capacidade de água disponível (CAD), pH, teores de matéria orgânica (MO), P disponível, Al, Ca, Mg e K trocáveis e CTC efetiva (CTCe) na profundidade de 0 a 20 cm do solo. Correlações significativas ($p < 0,05$) a partir de $r = \pm 0,54$ (linha horizontal tracejada).

2.3.5. Relação entre a produtividade e os teores nutricionais foliares

Em MG, observaram-se correlações positivas entre IMAV, IMAB, Hdom e os teores foliares de N, P, Mg e B (Figura 5), enquanto, em SP, essas variáveis se relacionaram positivamente com os teores de Mg, Cu e Zn. Já no PR, não se observaram correlações significativas entre as variáveis e os teores de nutrientes nas folhas. Da mesma forma que foi observado nos atributos do solo, a DBM não apresentou correlações significativas com os teores de nutrientes nas folhas em nenhuma região (Figura 5). De forma geral, as variáveis relacionadas à produção de madeira apresentaram maior quantidade de

correlações significativas com os teores de nutrientes nas folhas do que com os atributos químicos do solo. Os teores foliares não se correlacionaram com a fertilidade do solo avaliada ao final da rotação do cultivo (resultados não apresentados).

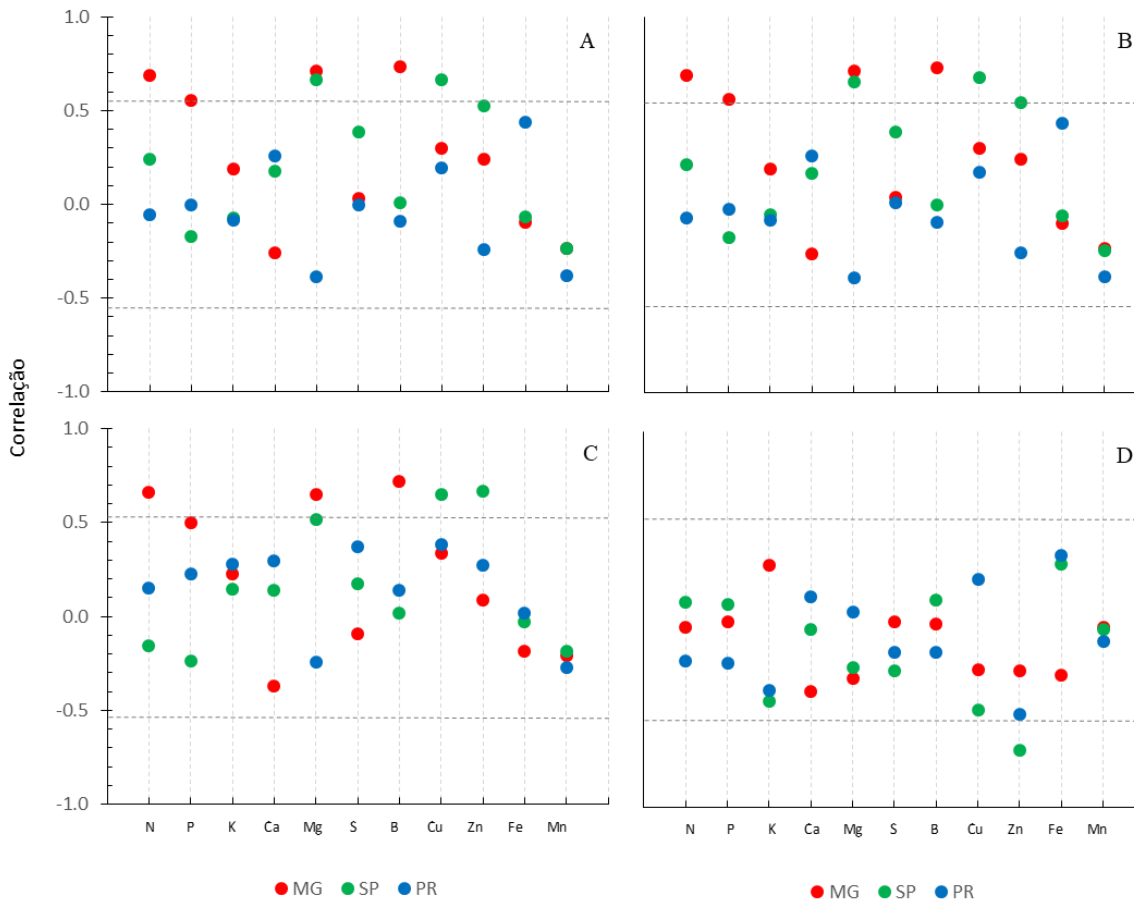


Figura 5. Correlação de Pearson, por região, entre as variáveis de produtividade: IMAV (A), IMAB (B), Hdom (C) e DBM (D) e o teor de nutrientes nas folhas. Correlações significativas ($p < 0,05$) a partir de $r = \pm 0,54$ (linha horizontal tracejada).

2.3.6. Regressões múltiplas relacionando a produtividade e os teores foliares às variáveis edafoclimáticas

Considerando todas as regiões, a regressão pelo método *stepwise* identificou que a precipitação pluvial é a variável que melhor explica a variabilidade do IMAV ($R^2 = 0,71$) (Tabela 8). Inclusive, dentro das regiões, com condições climáticas relativamente mais homogêneas, variáveis do clima, como IA, MDEF10 e PP, tiveram uma participação significativa para explicar as variações em IMAV. No PR, foi selecionada unicamente a variável DEFacum, porém sua contribuição para explicar a variância foi muito baixa (26%). Apenas em SP, a CAD (variável edáfica) explicaria a maior parte da variação do IMAV (57%).

A precipitação pluvial explicou 56% da variação da Hdom em todo o conjunto de dados, enquanto a idade e o MDEF10 aumentaram a predição do modelo ($R^2 = 0,83$, $p < 0,001$). Mesmo restringindo a amostragem a povoamentos com idades semelhantes, no final da rotação, identificou-se que a variável idade explicou uma porção importante da variação na Hdom, em nível geral, em MG e no PR. Selecionaram-se o déficit hídrico acumulado no período de crescimento das árvores e a densidade populacional como as melhores preditoras da DBM em nível geral ($R^2 = 0,56$, $p < 0,001$). Porém, dentro das regiões, não foi possível estabelecer relações entre a DBM e os fatores ambientais estudados.

Também, selecionaram-se variáveis climáticas como as melhores preditoras dos teores de N, P e K nas folhas, tanto em nível geral como regional. De fato, a temperatura média anual foi identificada como a variável que mais contribuiu para explicar a variância, em nível geral, dos teores de N (64%), de P (55%) e de K (34%). Ademais, identificou-se a ETP como a variável mais importante para explicar as variações dos teores de N nas folhas em MG e em SP. O mesmo ocorreu para os teores foliares de P nessas regiões; além disso, o teor de P-resina no solo melhorou a predição dos modelos. Em SP e no PR, os teores de K nas folhas relacionaram-se, principalmente, com variáveis climáticas. Já em MG não se encontraram combinações de variáveis que permitissem explicar a variação dos teores de K nas folhas (Tabela 8).

2.3.7. Variáveis edafoclimáticas que diferenciam as regiões

A análise discriminante canônica permitiu identificar variáveis que possibilitam a separação, com alto nível de significância (Lambda de Wilks = 0,00099516; $p < 0,0001$), dos sítios de estudo em três grandes ambientes. A diferenciação dos ambientes foi determinada, principalmente, por variáveis climáticas. As variáveis canônicas resultantes da combinação linear de T, ETP, MDEF10, e dos teores de Ca, Mg, K e areia no solo, explicaram 95,9% da separação dos grupos; no entanto, somente as três variáveis relacionadas ao clima, já permitem explicar 94,4% dessa diferenciação entre grupos (Tabela 9). As duas funções discriminantes canônicas obtidas permitiram separar, claramente, os grupos de parcelas, de forma que as regiões de alocação das parcelas no espaço multivariado, coincidem com a separação geográfica das mesmas. (Figura 6).

Tabela 8. Equações de regressão selecionadas usando o procedimento *stepwise*, tendo as variáveis IMAV ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), Hdom (m), DBM (g cm^{-3}) e teores foliares de N, P e K (g kg^{-1}) como variáveis dependentes e variáveis climáticas, edáficas, idade do povoamento e densidade populacional como variáveis preditoras⁽¹⁾. Regressões ajustadas para todo o conjunto de dados (Geral) e para cada região separadamente (MG, SP, PR). A ordem dos valores de R² parcial corresponde à sequência da posição das variáveis na equação de regressão.

Região	Equação	R ²	RMSE	Valor p	R ² parcial
Geral	IMAv = -9,9726 + 0,0439 PP	0,71	8,08	<0,001	0,71
MG	IMAv = -90,124 + 126,352 IA + 0,581 MDEF10	0,84	5,15	<0,001	0,79 0,05
SP	IMAv = -126,574 + 0,331 CAD + 2,777 MDEF10 + 0,081 PP	0,77	4,65	0,002	0,57 0,11 0,09
PR	IMAv = 62,362 - 0,065 DEFacum	0,26	6,04	0,060	0,26
Geral	Hdom = -27,67 + 0,025 PP + 2,908 I + 0,181 MDEF10	0,83	1,66	<0,001	0,56 0,21 0,06
MG	Hdom = -26,105 + 31,243 IA + 4,408 I	0,85	1,91	<0,001	0,65 0,20
SP	Hdom = 23,205 + 0,099 EXD	0,21	1,66	0,101	0,21
PR	Hdom = 12,352 + 0,011 DP + 1,034 I	0,56	0,96	0,011	0,43 0,13
Geral	DBM = 0,526 + 0,000012 DEFacum - 0,000052 DP	0,58	0,02	<0,001	0,35 0,23
MG	DBM = não significativa	-	-	-	-
SP	DBM = não significativa	-	-	-	-
PR	DBM = não significativa	-	-	-	-
Geral	N = 56,1604 - 1,6799 T - 0,0002 MO	0,68	2,99	<0,001	0,64 0,04
MG	N = -8,522 + 0,012 ETP + 0,008 PP	0,73	1,05	0,001	0,59 0,14
SP	N = 1,5891 + 0,0157 ETP + 0,0428 MO	0,67	0,45	0,002	0,53 0,13
PR	N = 2,399 + 3,658 I	0,29	2,80	0,045	0,29
Geral	P = 5,0904 - 0,1743 T + 0,0227 Psolo	0,57	0,38	<0,001	0,55 0,02
MG	P = -0,585 + 0,002 ETP - 0,124 Psolo	0,87	0,06	<0,001	0,55 0,32
SP	P = -1,236 + 0,002 ETP + 0,032 Psolo	0,65	0,09	0,003	0,54 0,11
PR	P = 3,60 + 0,003 ARG - 0,062 MO	0,41	0,39	0,053	0,22 0,19
Geral	K = 5,339 - 0,272 T + 0,726 I + 0,496 Ksolo	0,48	0,81	<0,001	0,34 0,07 0,06
MG	K = não significativa	-	-	-	-
SP	K = -1,860 + 0,025 DEF + 3,244 IA	0,58	0,29	0,009	0,35 0,23
PR	K = 18,488 - 12,073 IA + 1,255 I	0,72	0,76	0,001	0,52 0,20

⁽¹⁾ PP = precipitação média anual (mm ano^{-1}), T = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), ETP = evapotranspiração potencial (mm ano^{-1}), ETR = evapotranspiração real (mm ano^{-1}), DEF = déficit hídrico (mm ano^{-1}), EXD = excedente hídrico (mm ano^{-1}), DEFacum = déficit hídrico acumulado (mm), MDEF10 = número de meses com déficit hídrico > 10mm (meses), IA = Índice de aridez, ARG = teor de argila de 0-20 cm (g kg^{-1}), CAD = capacidade de água disponível (mm), MO = matéria orgânica (g dm^{-3}), Psolo = P disponível no solo (mg dm^{-3}), Ksolo = K trocável no solo ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), I = idade (anos), DP = densidade populacional (No. árvores ha^{-1}).

Tabela 9. Resumo da análise discriminante canônica e identificação das variáveis ambientais com maior poder discriminatório entre as regiões MG, SP e PR.

Variáveis	Valor F	p > F	Lambda de Wilks	p < Lambda	CCMQ ⁽¹⁾	p > CCMQ
T	536	<0,0001	0,03510	<0,0001	0,4825	<0,0001
ETP	65	<0,0001	0,00793	<0,0001	0,8684	<0,0001
MDEF10	47	<0,0001	0,00225	<0,0001	0,9437	<0,0001
Mg ⁽²⁾	4	0,035	0,00187	<0,0001	0,9489	<0,0001
Ca ⁽²⁾	6	0,006	0,00140	<0,0001	0,9547	<0,0001
Areia ⁽²⁾	3	0,053	0,00118	<0,0001	0,9572	<0,0001
K ⁽²⁾	3	0,063	0,00100	<0,0001	0,9588	<0,0001

⁽¹⁾ Correlação Canônica Média Quadrada. ⁽²⁾ Teores no solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade.

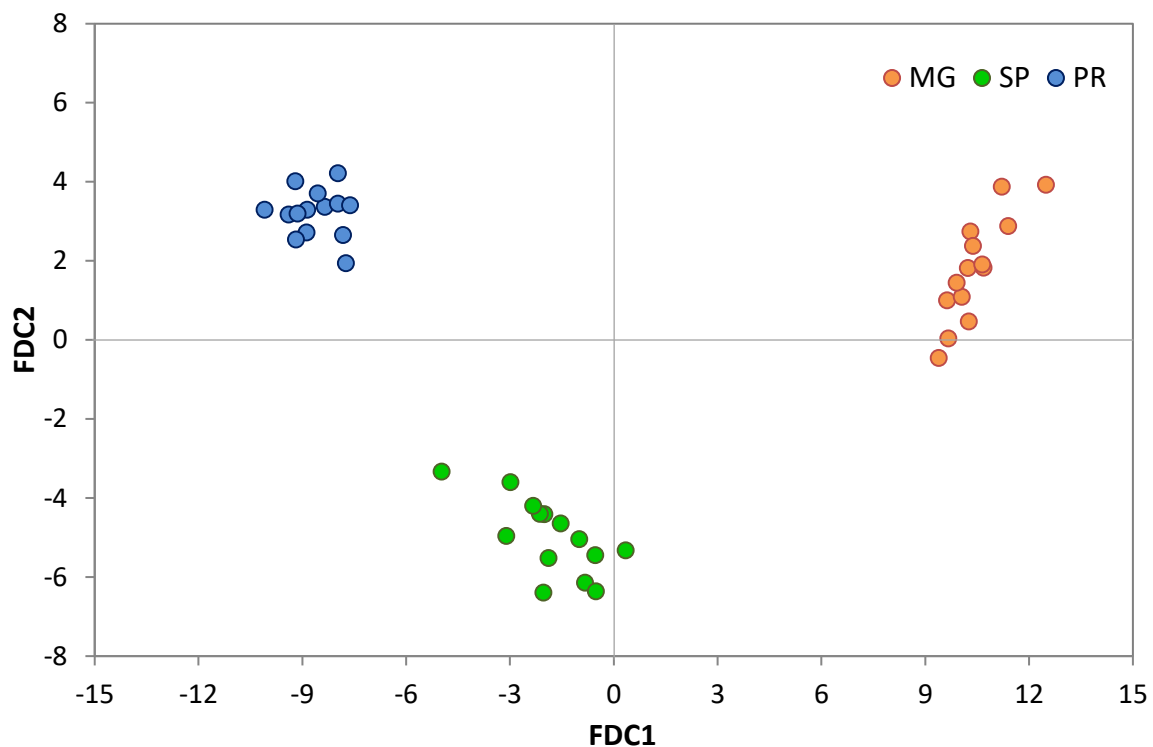


Figura 6. Representação espacial dos 42 sítios pelas duas funções discriminantes canônicas (FDC):

$$\text{FDC1} = 1,650 \text{ T} - 0,571 \text{ ETP} + 0,416 \text{ MDEF10} - 0,659 \text{ Ca} + 1,087 \text{ Mg} - 0,583 \text{ K} - 0,568 \text{ Areia};$$

$$\text{FDC2} = -3,207 \text{ T} + 2,730 \text{ ETP} + 1,032 \text{ MDEF10} + 0,992 \text{ Ca} - 1,153 \text{ Mg} - 0,139 \text{ K} + 0,181 \text{ Areia}$$

2.4. Discussão

2.4.1. Efeito das condições edafoclimáticas na produtividade

Considerando todas as condições edafoclimáticas estudadas, a produtividade em volume de madeira (IMAV) variou entre 15,3 e 76,6 m³ha⁻¹ ano⁻¹, enquanto a produtividade em biomassa do tronco (IMAB), entre 7,6 e 33,2 t ha⁻¹ ano⁻¹. Essas variações de cinco vezes no IMAV e de quatro, no IMAB, estiveram influenciadas, principalmente, pelas diferenças na precipitação pluvial entre locais. De modo

geral, as variáveis edáficas não explicaram, de maneira significativa, as variações na produtividade. Esses resultados reiteram que a disponibilidade hídrica constitui um dos fatores que mais influencia a produtividade das plantações de eucalipto em ambientes tropicais (Stape, 2004, Gonçalves et al. 2013).

O efeito da oferta hídrica sobre as plantações florestais tem sido amplamente estudado. No Brasil, os projetos Brazil Eucalyptus Potential Productivity (BEPP) e Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Térmico, Hídrico e Biótico (TECHS) trouxeram evidências importantes, as quais demonstram constituir a disponibilidade hídrica um dos principais fatores a controlar a produtividade do eucalipto. Considerando um gradiente edafoclimático mais amplo do que o estudado neste trabalho, na rede experimental do TECHS, observou-se uma variação do IMAV do clone AEC144 de aproximadamente seis vezes entre os locais menos e os mais produtivos (IPEF, 2019). Neste trabalho, constatou-se redução de $4,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no IMAV, para cada 100 mm de chuva a menos na precipitação anual, dado semelhante à média observada para todos os clones estudados no TECHS: $4,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IPEF, 2019). Stape (2008) notou uma variação na produção de biomassa total das árvores de $2,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para cada 100 mm de chuva a menos, num gradiente de precipitação pluvial entre 800 e 1600 mm ano^{-1} . No presente trabalho, a produção de biomassa do tronco diminuiu em $1,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 100 mm de chuva a menos.

A temperatura média e a evapotranspiração potencial relacionaram-se de forma negativa à produção de madeira. Silva et al. (2020b) também observaram correlações negativas entre o IMAV do clone AEC144 aos seis anos de idade e a T ($r = -0,63$) e a ETP ($r = -0,65$), considerando amplitude de temperatura entre 17,1 e 27,5°C e de ETP entre 481 e 1496 mm ano^{-1} . Queiroz et al. (2020) notaram que a faixa normal de temperatura média anual para o crescimento de oito materiais genéticos de origem tropical e subtropical no Brasil encontrava-se entre 18 e 22 °C. Neste estudo, a produtividade máxima do clone AEC144 ($76,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi observada aos 21°C; já a produtividade média ($56,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) dos sítios com temperaturas na faixa normal relatada por Queiroz et al. (2020) superou em 74% a dos sítios com temperaturas acima dessa faixa ($32,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Analisando dados de produtividade de quase 2.000.000 ha de plantações comerciais de eucalipto, num amplo gradiente climático (PP = 850-1600 mm ano^{-1} , T = 18-28 °C, DEF = 0-250 mm ano^{-1}), Gonçalves et al. (2017) encontraram correlações altamente significativas ($r = -0,86$) entre IMAV e DEF. Esses autores observaram redução de $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 10 mm de incremento no déficit hídrico anual. Neste trabalho, o valor médio de redução do IMAV foi de $0,53 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 10 mm de DEF ($r = -0,74$). O menor valor de redução da produtividade observada neste trabalho pode estar associado à maior plasticidade do clone AEC144.

Em MG, os índices de produtividade não só foram menores como também mais variáveis, por influência do maior déficit hídrico e da maior amplitude na precipitação. Nas parcelas com PP < 1000 mm ano^{-1} (n = 8), o IMAV médio foi $23,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto, nas parcelas com PP > 1000 mm ano^{-1} (n = 6), de $43,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As variáveis edáficas relacionadas à capacidade de armazenamento de

água no solo, como teor de argila, matéria orgânica e CAD, também apresentaram a maior amplitude de valores em MG, em comparação às demais regiões. Ao contrário do que se esperava, não se encontraram relações positivas entre esses atributos do solo e a produtividade nessa região; isso porque as parcelas com os solos mais argilosos apresentaram, também, os menores índices pluviométricos, sendo a baixa oferta hídrica o fator mais limitante nestas áreas.

Em SP, o teor de argila e a CAD correlacionaram-se positivamente com a produtividade dos plantios. Nessa região, apesar de o volume de chuvas superar a demanda evapotranspirativa anual, ocorre uma redução expressiva das chuvas no meio do ano. De fato, a PP, nos seis meses mais secos, correspondeu apenas a 24% da PP dos seis meses mais úmidos. Tal condição faz com que a maior capacidade de armazenamento de água no solo se mostre relevante para garantir o crescimento contínuo dos plantios, mesmo nos meses de menor oferta hídrica, amenizando os efeitos da sazonalidade.

Diversos trabalhos têm reportado a textura como o atributo mais importante para explicar o potencial produtivo de um solo. Gava e Gonçalves (2008) identificaram uma relação positiva entre o teor de argila no solo e o IMAB, devido ao maior conteúdo de água disponível no solo com o aumento do teor de argila. Gonçalves et al. (2012), estudando as relações entre os atributos do solo e a produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, em Itatinga, SP, observaram que os teores de argila e de MO na profundidade de 0-20 cm foram as variáveis que melhor explicaram as diferenças do IMAV aos seis anos de idade ($R^2 = 84\%$). Em ambos os estudos, as parcelas localizavam-se numa mesma região, com poucas variações no clima entre elas. No presente trabalho, observou-se amplitude relativamente alta da precipitação (258 mm ano^{-1}) e alto coeficiente de variação do déficit hídrico ($CV=44\%$) entre as parcelas em SP. Isso justifica por que, nessa região, o MDEF10 e a PP foram selecionados nos modelos de regressão, além da CAD, como variáveis significativas para explicar a variação do IMAV.

Silva et al. (2020a) usaram o índice de aridez para estratificar os sítios do TECHS em dois grupos, de modo a verificar as relações entre a produtividade e os atributos do solo, concluindo que aquele que mais afeta a produtividade depende do clima. Em climas subúmidos, o teor de argila correlaciona-se positivamente à produção de madeira, embora, em climas úmidos, não. No presente trabalho, constatou-se uma correlação positiva, porém não significativa, entre o teor de argila e a produtividade no PR, a região mais úmida e com menor sazonalidade de precipitação. Esses fatos sugerem que, em regiões de alta oferta hídrica e menores demandas evapotranspirativas, a capacidade de retenção de água no solo deixa de ser um fator limitante da produtividade.

Os atributos químicos do solo não apresentaram correlações significativas com as variáveis de produtividade em nenhuma das regiões. Isso se deve, muito provavelmente, ao fato de os programas de fertilização, adotados nas empresas, terem suprido, satisfatoriamente, as demandas nutricionais das árvores nos estágios iniciais de crescimento, tornando-as menos dependentes da fertilidade natural dos solos. Por outro lado, nas condições deste estudo, há outros fatores, como os climáticos e os atributos físicos do solo, que exercem influência muito maior sobre a produção de madeira.

Hansson et al. (2020) estudaram, num amplo gradiente de solos ácidos, as relações entre os atributos químicos do solo e a produtividade de ecossistemas florestais de climas temperados e tropicais, concluindo que os parâmetros químicos obtidos pelas análises de solo tradicionais não constituem bons preditores da produtividade. Estudando os fatores ambientais relacionados ao acúmulo de biomassa em plantações de eucalipto, Stape (2002) identificou o teor de carbono total (C) como o único atributo do solo com relação positiva e significativa para a produtividade das florestas. No entanto, ao incluir a precipitação em modelos de predição da biomassa, o C do solo não se mostrou como variável significativa. Gava (2005) não encontrou relações significativas entre os teores de P, Ca e K no solo e o IMAB de *E. grandis* em SP, onde observou apenas boas correlações com MO, com Al e com CTCe, que estavam associadas ao teor de argila no solo. Também, Gonçalves et al. (2012) observaram correlações positivas com pH, com CTCe e com teores de K, de Mg e de Ca, porém não por uma relação direta de causa e efeito, mas, sim, porque esses parâmetros se relacionavam, positivamente, ao teor de argila. Já Silva et al. (2020b), ao considerar um gradiente climático muito amplo, não encontraram relações significativas entre o IMAV do clone AEC144 e variáveis edáficas, como CTC, argila e MO.

2.4.2. Efeito das condições edafoclimáticas na densidade da madeira

Mesmo constituindo uma característica da madeira com alta herdabilidade (Stackpole et al., 2011; Apiolaza et al., 2005; Tan et al., 2018), a densidade básica (DBM) mostrou-se afetada por variáveis do ambiente e do manejo. O déficit hídrico anual e o acumulado constituem as variáveis com maior correlação positiva com a DBM.

Diversos trabalhos têm apresentado os efeitos das condições climáticas sobre a DBM do gênero *Eucalyptus*, reportando respostas significativas à disponibilidade hídrica. Há evidências da capacidade de algumas espécies em aumentar a sua eficiência na condutividade hidráulica e em reduzir a vulnerabilidade à cavitação e à embolia, quando submetidas ao estresse hídrico (Leal et al., 2004; Wimmer et al., 2002; Fernández et al., 2019; Barbosa et al., 2019). Nessas condições, como medida de proteção, modifica-se a anatomia do xilema, a fim de reduzir o diâmetro dos vasos, o que acarreta o incremento da densidade da madeira. Em algumas espécies, também é possível observar o aumento da frequência dos vasos, aliado à diminuição do seu tamanho, como estratégia para ampliar a eficiência no transporte de água pelo xilema. As estratégias de compensação entre tamanho e frequência de vasos, a configuração do sistema vascular e as variações na densidade da madeira são altamente dependentes do genótipo e das suas interações com o ambiente (Fernández et al., 2019; Barbosa et al., 2019; Costa et al., 2020).

Em concordância com os resultados obtidos neste estudo, Sette Jr et al. (2016) observaram que a densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* foi sensível às variações na precipitação pluvial, notando que essas variáveis se relacionavam inversamente. No entanto, Costa et al. (2020) encontraram padrões

de resposta da DBM às variações de precipitação e de temperatura muito diferentes para três clones de eucalipto (dois de *E. urophylla* e um de *E. urophylla x brassiana*). Rocha et al. (2020) notaram, aos quatro anos de idade, correlações negativas da DBM com a precipitação e positivas com o déficit hídrico em clones de *E. grandis*, *E. grandis x camaldulensis* e *E. saligna*; porém, para o clone AEC144 (*E. urophylla*), as relações foram opostas, divergindo dos resultados obtidos no presente trabalho. É possível que essas relações mudem com o tempo, pois a densidade da madeira é fortemente influenciada pela idade, já que, à medida que se forma o lenho adulto, a densidade tende a ser maior, em virtude do aumento da espessura da parede das fibras e da redução da frequência de vasos (No. vasos mm⁻²) (Sette Jr et al., 2012).

Além do déficit hídrico, a densidade populacional contribuiu a explicar a variação, em nível geral, na DBM (Tabela 8). O efeito da densidade populacional sobre a DBM representa-se, por exemplo, no fato de o PR apresentar maiores valores médios de DBM em comparação a SP (Figura 2), mesmo com menores valores de déficit hídrico naquela região. Malan e Hoon (1992) sugerem que árvores a crescer mais livremente atingem níveis máximos de densidade mais cedo, resultando em lenhos com grande proporção de madeira adulta e densidade relativamente uniforme. Em convergência com essa hipótese, na região norte de Minas Gerais, Vieira (2011) observou diferenças significativas na DBM de árvores de um clone de *E. grandis x camaldulensis* crescendo em diferentes espaçamentos, com a área útil, por planta, variando entre 1,5 e 9,0 m². Aos sete anos de idade, a DBM variou entre 0,51 e 0,56 g cm⁻³ entre o menor e o maior espaçamento, respectivamente. Moulin et al. (2017) notaram, muito precocemente, o efeito do espaçamento sobre a variação na DBM num clone de *E. grandis x urophylla*. Aos 12 meses de idade, constataram uma tendência de aumento na DBM desde 0,35 g cm⁻³, no espaçamento 3,0 x 0,5 m, até 0,41 g cm⁻³, no espaçamento 3,0 x 3,0 m. Miranda et al. (2003) observaram uma variação da DBM de 0,56 a 0,59 g cm⁻³, entre o menor (3x2m) e o maior espaçamento (4x5m), respectivamente, em árvores de *E. globulus*, aos 18 anos de idade.

Os atributos edáficos não se relacionaram, significativamente, com a DBM (Figura 4). Nas regiões, a variação da DBM foi muito baixa ($CV \leq 5\%$), o que justificaria, parcialmente, a dificuldade em encontrar uma combinação de variáveis que explicasse, em nível regional, a variação da DBM (Tabela 8).

2.4.3. Estado nutricional das árvores e sua relação com o clima e a produtividade

As variáveis climáticas afetaram significativamente o estado nutricional das árvores. Em geral, a temperatura foi a variável que apresentou as maiores correlações com os teores foliares. Ainda, dentro das regiões, a evapotranspiração potencial teve destaque importante. De maneira semelhante, Herbert (1990) observou que a temperatura, a precipitação pluvial e a relação entre as duas (PP/T) explicaram entre 61 e 99% da variação nos teores de K, Ca, Fe, Zn e Cu em plantações de *E. grandis*, em Natal

(África do Sul). A variável climática mais importante mostrou-se a temperatura média anual, relacionada negativamente com os teores dos nutrientes nas folhas, comportamento influenciado pela redução do conteúdo de carbono orgânico no solo devido ao aumento da temperatura. As variáveis climáticas relacionadas positivamente com a produtividade, como a precipitação pluvial, também apresentaram correlações positivas com os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn ao final da rotação, independentemente da quantidade adicionada de fertilizantes na fase inicial de crescimento (Tabela 2). Por outro lado, as relações entre os teores nutricionais e as variáveis climáticas de correlação negativa com a produtividade também foram opostas.

Sardans e Peñuelas (2013) e Sardans et al. (2012) também observaram, num amplo gradiente climático na Espanha, que os maiores teores foliares de N, P e K, coincidiam com as melhores condições climáticas para o crescimento de florestas. A disponibilidade hídrica tem efeito positivo sobre as taxas de mineralização da matéria orgânica e, conseqüentemente, sobre a disponibilidade de nutrientes (Comerford, 2005), sendo este um processo crucial para a manutenção do adequado estado nutricional das plantações florestais em condições tropicais, onde predominam solos altamente intemperizados, de baixa fertilidade e alta acidez (Laclau et al., 2003). Somado isso, as condições climáticas influenciam o fluxo transpiratório e os mecanismos que regem a movimentação dos nutrientes no solo e a absorção destes pelas plantas (Comerford, 2005; Sardans et al., 2016). A temperatura influencia a fisiologia das plantas e a atividade das raízes; portanto, espera-se que em condições de temperatura favoráveis para o crescimento das raízes ocorram maiores taxas de absorção dos nutrientes (Herbert, 1991).

Contrariamente, os teores foliares de B e de Fe apresentaram correlação negativa com a precipitação pluvial, devido a que, em MG, a região com os menores índices pluviométricos, houve maior oferta destes nutrientes para as plantas. Ainda em MG, observou-se correlação positiva entre o teor foliar de B e a produtividade. Nesta região, é praxe aplicar altas doses do nutriente na adubação, tanto no solo, quanto por meio de pulverizações foliares, como estratégia para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico (Pita-Barbosa et al., 2016; Gonçalves et al., 2017).

As variáveis edáficas não participaram, de forma significativa, na variação dos teores de nutrientes nas folhas. Isso devido, provavelmente, a que a fertilização mineral conseguiu suprir grande parte da demanda inicial das plantas por nutrientes, mascarando as relações entre o conteúdo de nutrientes na planta e a oferta do solo.

Observaram-se correlações positivas entre a produtividade e os teores foliares de N, P, Mg e B em MG, e de Mg, Cu e Zn em SP; no PR, entretanto, não se puderam notar tais relações. De acordo com Barros et al. (2000), as taxas de acúmulo de nutrientes relacionam-se, positivamente, ao crescimento do eucalipto, podendo variar a magnitude desta relação em função da demanda específica dos genótipos e das condições de sítio. A falta de correlação entre as variáveis nutricionais e a produtividade no PR sugerem que não houve limitações nutricionais nesta região, o que pode estar associado a condições edafoclimáticas mais favoráveis para o crescimento das árvores. Sardans et al. (2016), estudando a

influência de fatores ambientais na composição elementar das folhas em florestas da região mediterrânea, concluíram que em regiões com maior aridez, onde a eficiência no uso da água é crítica, existem relações mais diretas entre o crescimento das árvores e o seu estado nutricional.

2.4.4. Diferenciação dos ambientes de produção

A seleção das três regiões deste estudo baseou-se em conhecimento prévio sobre suas características ambientais, que pressupõem diferenças nas produtividades médias atingíveis. A análise discriminante canônica confirmou a separação das três regiões geográficas em ambientes com características edafoclimáticas significativamente diferentes. Somente a temperatura do ar explicou 48,2% da variância entre os ambientes. Quando se adicionam, às funções discriminantes, as variáveis ETP e MDEF10, também relacionadas à T, é possível explicar 94,4% da separação entre os grupos. Pode-se afirmar, assim, que as três variáveis possuem alto poder discriminatório nas condições de sítio estudadas.

Numa análise de agrupamentos, usando árvores de regressão multivariada e levando em consideração os padrões de produtividade e as condições climáticas, Araújo et al. (2019) agruparam 11 sítios do TECHS em três grandes ambientes, dos 48 aos 53 meses de idade. Nessa condição, o gradiente de temperatura constituiu o fator principal para separar os ambientes, permitindo explicar 43,8% da variância total. Nas idades entre 31 e 34 meses, separaram-se os locais em dois grandes grupos, em virtude, principalmente, das diferenças na precipitação média no período mais seco do ano, a qual explicou 51,7% da variância total.

A contribuição dos atributos edáficos na separação dos ambientes foi muito baixa. Isso se deve, à alta variabilidade observada nas características químicas e físicas dos solos dentro das regiões e ao fato de ocorrerem valores semelhantes de atributos edáficos entre regiões. Por outro lado, para conduzir o trabalho, selecionaram-se, propositalmente, áreas com solos sem grandes restrições à produção florestal. Na presença de solos com, por exemplo, impedimentos físicos para se desenvolverem as raízes, variáveis edáficas, como a profundidade efetiva, possivelmente, apresentariam um maior grau de poder discriminatório (Alvarez-Alvarez et al., 2011; Braga et al., 1999).

A análise discriminante também tem apresentado eficiência na identificação das características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios florestais ao nível de microrregião. Braga et al. (1999) estudaram 85 características ambientais, como atributos químicos e físicos do solo, espessura dos horizontes, fisiografia, insolação, entre outras, na região denominada Mar dos Morros (Minas Gerais; 18°30'Sul, 42°45'Oeste). Os autores classificaram 58 locais em três grupos com diferente potencial produtivo, em função da altura média das árvores dominantes aos cinco anos e meio de idade. Ao realizar a análise discriminante, observaram uma alta eficácia das características fisiográficas na separação dos locais, concordando com os grupos de potencial produtivo previamente estabelecidos.

Entre as variáveis fisiográficas mais significativas estiveram a altitude, a exposição, a pedoforma e a declividade. Tais variáveis refletem, indiretamente, os efeitos de outros fatores a afetar, diretamente, o crescimento das árvores, como a temperatura e a disponibilidade de água, de luz e de nutrientes.

2.5. Conclusões

Observaram-se diferenças na produtividade de madeira de até cinco vezes entre as regiões estudadas. O incremento médio anual de volume e biomassa do tronco e a altura dominante foram influenciados positivamente pela disponibilidade hídrica. A densidade da madeira apresentou comportamento contrário.

Os teores de nutrientes nas folhas também foram afetados pelas condições climáticas. De forma geral, apresentaram relação inversa com a temperatura do ar.

Os atributos químicos do solo não afetaram significativamente a produtividade. Em São Paulo, os atributos físicos, associados à capacidade de armazenamento de água do solo, influenciaram o crescimento dos plantios.

A temperatura do ar, a evapotranspiração potencial e o número de meses com déficit hídrico acima de 10mm foram as variáveis com maior poder discriminatório, e permitiram separar as regiões em três ambientes de produção diferentes.

Referências

- ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S.Z.; PARKS, S.A.; HEGEWISCH, K.C. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Nature - Scientific Data** 5, n.170191, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P., KHOURI, E.A., CÁMARA-OBREGÓN, A., CASTEDO-DORADO, F., BARRIO-ANTA, M. Effects of foliar nutrients and environmental factors on site productivity in *Pinus pinaster* Ait. Stands in Asturias (NW Spain). **Annals of Forest Science**, 2011, 68:497–509.
- APIOLAZA, L.A., RAYMOND, C.A., YEO, B.J. Genetic Variation of Physical and Chemical Wood Properties of *Eucalyptus globulus*. **Silvae Genetica**, 54-4/5, p.160-166, 2005.

- ARAÚJO, M.J., PAULA, R.C., CAMPOE, O.C., CARNEIRO, R.L. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 454, 117631, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRAZILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941: madeira – determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.
- BARBOSA, T.L., OLIVEIRA, J.T.S., ROCHA, S.M.G., CÂMARA, A.P., VIDAURRE, G.B., ROSADO, A.M., LEITE, F.P. Influence of site in the wood quality of Eucalyptus in plantations in Brazil. **South. For. J. For. Sci.** 81 (3), 247–253, 2019.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, p.270-283, 2000.
- BATISTA J.L.F., COUTO H.T.Z., FILHO D.F.S. **Quantificação de recursos florestais**. Piracicaba. 384 p, 2014.
- BINKLEY D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R.L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v.405, p.271-283, 2017.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; STAPE, J.L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS Project. **Forest Ecology and Management** 462 (2020) 117953
- BRAGA, F.A., BARROS, N.F., SOUZA, A.L., COSTA, L.M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:291-298, 1999.
- COHEN, J.; COHEN, P.; WEST, S.G.; AIKEN, L.S. **Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences**. 3rd ed. Incorporated: Lawrence Erlbaum Associates. 1983.
- COMERFORD, N.B. Soil factors affecting nutrient bioavailability. In: BASSIRIRAD, H. (Ed.) **Nutrient acquisition by plants, an ecological perspective**. Berlin, Ecological Studies, v.181, p.1-14, 2005

COSTA, S.E.L.; SANTOS, R.C.; VIDAURRE, G.B.; CASTRO, R.V.O.; ROCHA, S.M.G.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.C.; SANTOS, C.P.S.; GOMES, I.R.F.; CARVALHO, N.F.O.; TRUGILHO, P.F. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, 458, 117807, 2020.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed., Brasília, DF: EMBRAPA, 2018, 356 p.

FERNÁNDEZ, M.E., BAROTTO, A.J., MEIER, A.M., GYENGE, J.E., TESÓN, N., MARTORELLO, A.S.Q., MERLO, E., SALDA, G.D., ROZENBERG, P., MONTEOLIVA, S. New insights into wood anatomy and function relationships: How Eucalyptus challenges what we already know. **Forest Ecology and Management** 454, 117638, 2019.

GAVA, J.L. **Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de Eucalyptus grandis para produção de celulose**. ESALQ-USP, Piracicaba, 54 p. 2005.

GAVA, J. L.; GONCALVES, J. L. D. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of Eucalyptus grandis clone. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 3, p. 306–313, 2008.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000. p. 3-55.

GONÇALVES, J. L. de M., ALVARES, C. A., GONÇALVES, T.D., MOREIRA, R.M., MENDES, J.C., GAVA, J.L. Soil and productivity mapping of Eucalyptus grandis plantations, using a geographic information system. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 187-201, jun. 2012.

- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. August 2013, p. 6–27, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.
- GONÇALVES, J.L.M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002, p.1-45.
- KARNA HANSSON, JEAN-PAUL LACLAU, LAURENT SAINT-ANDRÉ, LOUIS MARESCHAL, GREGORY VAN DER HEIJDEN, CLAUDE NYS, MANUEL NICOLAS, JACQUES RANGER, ARNAUD LEGOUT. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 1: Common soil chemical analyses were poor predictors of stand productivity across a wide range of acidic forest soils. **Forest Ecology and Management** 461 (2020) 117843.
- HERBERT, M. A. The Influence of Site Factors on the Foliar Nutrient Content of *Eucalyptus grandis* in Natal. **South African Forestry Journal**, v. 156, n. 1, p. 28–34, mar. 1991.
- IPEF. **Programa Cooperativo TECHS-IPEF, Relatório Final** – 2012-2018. Piracicaba, IPEF, 2019.
- LACLAU, J.P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, 91, p. 879-892, 2003.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUERE, V.; KRUSCHE, A.V.; E, M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRE, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management** 259 (2010) 1771–1785.

- LEAL, S., PEREIRA, H., GRABNER, M., WIMMER, R. Clonal and site variation of vessels in 7-year-old *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Vol. 24 (2), p.185–195, 2003.
- MALAN, F.S., HOON, H. Effect of Initial Spacing and Thinning on Some Wood Properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, No. 163, p.13-20, 1992.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed., Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANLEY, B.J.F. **Métodos estatísticos multivariados**. 3ª ed., Porto Alegre, Bookman, 2008, 229p.
- MIRANDA, I., TOMÉ, M., PEREIRA, H. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. **Appita Journal**, v. 56, No. 2, p.140-144, 2003.
- MOULIN, J.C., ARANTES, M.D.C., OLIVEIRA, J.G.L., CAMPINHOS, E., GOMES, F., VIDAURRE, G.B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente** 2017; 24: e00073914, p. 1-10, 2017.
- NAMBIAR, E.K.S. Relationships between water, nutrients and productivity in Australian forests: Application to wood production and quality. **Plant and Soil** 168-169: 427-435, 1995.
- PITA-BARBOSA, A.; HODECKER, B.E.R.; BARROS, N.F. Boron as mitigator of drought damage in *Eucalyptus*: a genotype-dependent mechanism? **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 851-861, 2016.
- QUEIROZ, T.B., CAMPOE, O.C., MONTES, C.R., ALVARES, C.A., CUARTAS, M.Z., GUERRINI, I.A. Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest Ecology and Management** 472 (2020) 118248.
- RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade dos solos tropicais**. Campinas. Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285 p.

ROCHA, S.M.G., VIDAURRE, G.B., PEZZOPANE, J.E.M., ALMEIDA, M.N.F., CARNEIRO, R.L., CAMPOE, O.C., SCOLFOROD, H.F., ALVARES, C.A., NEVES, J.C.L., XAVIER, A.C., FIGURA, M.A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, 473, 118290, 2020.

ROLIM, G. S., SENTELHAS, P. C., BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n.1, p133-137, 1998.

ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.

RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.

SAADAOUI, E., BEN YAHIA, K., DHAHRI, S., BEN JAMAA, M.L., KHOUJA, M.L. An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. – **Forestry Studies Metsanduslikud Uurimused** 67, 86–96, 2017.

SARDANS, J., ALONSO, R., CARNICER, J., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M., VIVANCO, M.G., PEÑUELAS, J. Factors influencing the foliar elemental composition and stoichiometry in forest trees in Spain. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics** 18, 52–69, 2016.

SARDANS, J., PEÑUELAS, J., COLL, M., VAYREDA, J., RIVAS-UBACH, A. Stoichiometry of potassium is largely determined by water availability and growth in Catalanian forests. **Functional Ecology** p 1-13, 2012.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.2 User's guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2016.

- SCHÖNAU, A. P. G.; HERBERT, M. A. Relationship between Growth Rate and Foliar Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, v. 120, n. 1, p. 19–23, 1982.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.D.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, p719-734, 1933.
- SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEP, 1998. 463 p.
- SCOLFORO, H.F.; McTAGUE, J.P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. **Forest Ecology and Management**, 466, 118079, 2020.
- SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L.A.; DUARTE, Y.C.N.; VISSÉS, F.A. Yield gap. Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agronômicas**, 155, p.9-12, 2016.
- SETTE JR, C.R. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore** 40 (2), p. 337–346, 2016.
- SETTE JR, C.R., OLIVEIRA, I.R., FILHO, M.T., YAMAJI, F.M. LACLAU, J.P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012.
- SILVA, R.M.L.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; OTTO, M.S.G.; STAPE, J.L. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in Eucalyptus Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. **Forests**, 7, 117, p.1-12, 2016.
- SILVA, M.K.A., ROSA, R., 2009. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais/ Brasil. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4393-4400.

- SILVA, V.E., BUZETTI, S., LACLAU, J.P., MONTANARI, R., PANOSSO, A.R., DIAS, S.C.M., SILVA, J.F. Consequences of soil attributes on the productivity and eucalypt drought response in two climate types in Brazil. **Ci. Fl.**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 117-134, 2020a.
- SILVA, V.E., NOGUEIRA, T.A.R., ABREU-JUNIOR, C.H., HE, Z., BUZETTI, S., LACLAU, J.P., FILHO, M.C.M., GRILLI, E., MURGIA, I., CAPRA, J.F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management** 455, 117673, 2020b.
- STACKPOLE, D.J., VAILLANCOURT, R.E., ALVES, A., RODRIGUES, J., POTTS, B.M. Genetic Variation in the Chemical Components of *Eucalyptus globulus* Wood. G3: **Genes, Genomes, Genetics**, v.1, p.151-159, 2011.
- STAPE, J.L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in northeastern Brazil.** Colorado State University. Fort Collins, 2002, 225 p.
- STAPE, J., BINKLEY, D., RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 17 2004.
- TAN, B., GRATTAPAGLIA, D., WUE, H.X., INGVARSSON, P.K. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Sci.** 267, 84–93, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. **Climatology**, v. 3, n. 1, p. 104, 1955.
- VIEIRA, M.F.R. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia.** Dissertação (mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011, 71 p.
- WIMMER, R., DOWNES, G.M., EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. **Tree Physiol.** 22 (7), p. 449–457, 2002.

3. VALORES DE REFERÊNCIA REGIONAIS PARA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO

RESUMO

Para manter altas produtividades e garantir a sustentabilidade das plantações florestais, é necessário monitorar o estado nutricional das árvores por meio de análises foliares. Entretanto a acurácia dos diagnósticos nutricionais depende de os teores foliares utilizados como referência na interpretação das análises foliares. Considerando a carência de valores de referência nutricionais específicos para diferentes regiões e genótipos de eucalipto, no presente estudo, determinaram-se, pelos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, as faixas de suficiência e os níveis críticos dos nutrientes nas folhas em três regiões com condições climáticas distintas (Paraná, São Paulo e Minas Gerais) para o clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil (clone AEC144). Usaram-se análises foliares e dados de crescimento das árvores de 427 talhões com plantios entre 12 e 24 meses de idade. Os valores de referência obtidos foram influenciados pelas condições edafoclimáticas; além disso, verificou-se baixa concordância entre diagnósticos nutricionais usando faixas de suficiência gerais e regionais. Obtiveram-se maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná. Verificou-se uma alta frequência de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, K, Ca, Mg, e S em São Paulo. Conclui-se que o estabelecimento de valores de referência com maior especificidade, levando em conta as condições climáticas da região, pode contribuir para maior acurácia dos diagnósticos nutricionais, aprimorando as recomendações de fertilização e evitando perdas de produtividade.

Palavras-chave: Nutrição florestal, Análise foliar, Faixas de suficiência, Fertilização

ABSTRACT

To maintain a high and sustainable productivity in forest plantations, it is necessary to monitor the nutritional status of trees based on foliar analysis. The accuracy of the nutritional diagnosis depends on the leaf concentrations used as reference values for interpretations. Considering the lack of specific nutrient reference values for different regions and genotypes, in this study we determined sufficiency ranges and critical levels in three regions with different climatic conditions (Paraná, São Paulo and Minas Gerais) for the most planted *Eucalyptus urophylla* clone in Brazil (clone AEC144), by the Mathematical Chance and the Boundary-line approaches. We used data of foliar nutrient content and tree growth from 427 sites with 12 to 24 months-old plantations. The obtained reference values were influenced by edaphoclimatic conditions. Also, low concordance between nutritional diagnostics using general and regional sufficiency ranges was observed. The highest critical level for B and the lowest critical level for N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn were found in Minas Gerais; while, in São Paulo, were found the highest critical level for N and Mg, and, in Paraná, the highest critical level for P, Ca, S and Mn. A high frequency of plots with K and Zn deficiency was observed in Minas Gerais, while in São Paulo the most common deficiencies were observed for P, K, Ca, Mg and S. We concluded that for Brazilian conditions, with a large climatic gradient, establishing specific reference values for regions would contribute to a more accurate nutritional diagnosis, improving fertilizer recommendations as well as avoiding productivity losses.

Keywords: Forest nutrition, Leaf analyses, Sufficiency ranges, Fertilization

3.1. Introdução

Para manter altas produtividades nas plantações florestais e garantir a sua sustentabilidade, é recomendado monitorar o estado nutricional das árvores por meio de análises foliares, a fim de verificar a necessidade de adubações complementares (Neves et al., 2008; Bellote e Silva, 2000; Silveira et al., 2000). Entretanto a acurácia dos diagnósticos nutricionais depende de os teores foliares utilizados como referência na interpretação das análises foliares.

A disponibilidade de água no solo influencia o fluxo de nutrientes para as plantas e, junto à temperatura, afeta as taxas de absorção de nutrientes, refletindo-se nos teores foliares (Sardans et al., 2016; BassiriRad, 2000). Assim, o estabelecimento de valores de referência nutricional específicos por ambientes de produção, levando em conta as características edafoclimáticas do local, poderia contribuir para uma diagnose nutricional mais precisa, de modo a aprimorar as recomendações de fertilização, evitar perdas de produtividade e auxiliar no uso racional dos fertilizantes.

As demandas nutricionais do eucalipto podem variar em função do genótipo e da sua interação com o ambiente (Barros et al., 2000, Santana et al., 2002). Com o plantio de novos materiais genéticos, mais produtivos, em áreas novas, e com o emprego de novas técnicas de manejo, faz-se necessária a condução de novos estudos para a determinação dos ótimos nutricionais com maior especificidade (Lima Neto et al., 2020; Camacho et al., 2012).

Tradicionalmente, os níveis críticos e as faixas de suficiência dos nutrientes nas folhas têm sido gerados a partir de experimentos de calibração, onerosos e de longa duração, no caso do eucalipto (Wadt et al., 1998). No entanto existem alternativas para estabelecer, de forma mais prática e rápida, tais valores de referência, como os métodos da Chance Matemática (Wadt et al., 1996) e da Linha da Fronteira (Walworth et al., 1986), os quais possibilitam o uso de dados de monitoramento nutricional e de crescimento de plantações comerciais.

O método da Chance Matemática permite definir as faixas de suficiência a partir de intervalos de teores foliares nos quais há maior probabilidade de atingir altas produtividades, baseando-se na esperança matemática, e tendo como pressuposto o fato de que em grandes populações a frequência observada se aproxima da probabilidade (Wadt et al., 1996). Já o método da Linha da Fronteira, envolve a representação gráfica da produção em função dos teores dos nutrientes nas folhas mediante diagramas de dispersão, selecionando observações na região superior da nuvem de pontos para ajustar modelos polinomiais e obter os valores de referência a partir da produtividade máxima estimada por tais modelos (Souza et al. 2020). Esse método pressupõe que a linha da fronteira representa o efeito limitante do teor foliar em questão (variável independente) sobre a produtividade (variável dependente), e que todas as observações abaixo dessa linha resultam da influência de outros fatores de produção, diferentes daquele em estudo, sejam eles de ordem nutricional ou de qualquer outra natureza (Blanco-Macias et al. 2010; Walworth, 1986).

Considerando a carência de valores de referência nutricionais específicos para diferentes regiões e genótipos de eucalipto, no presente estudo, determinaram-se, por meio dos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, as faixas de suficiência e os níveis críticos dos teores de nutrientes nas folhas em três regiões com condições edafoclimáticas distintas para o clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil.

Objetivos:

- i. Estudar como os níveis críticos dos teores de nutrientes nas folhas podem variar em função das condições edafoclimáticas do sítio;
- ii. Estabelecer as faixas normais dos nutrientes nas folhas para plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*) em três regiões com características climáticas distintas;
- iii. Verificar o grau de concordância dos diagnósticos nutricionais, usando valores de referência para interpretação de análises foliares regionais e gerais;
- iv. Identificar as limitações nutricionais mais frequentes em cada região.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Localização e características climáticas

As áreas de estudo estão localizadas nas regiões centro e norte de Minas Gerais (MG), centro-oeste de São Paulo (SP) e norte do Paraná (PR). Compreendem os segmentos latitudinal 16°37'03" S a 24°36'51" S e longitudinal 43°37'23" O a 51°52'42" O, nos quais se observam variações importantes na temperatura média anual (Figura 7), no volume e na distribuição das chuvas ao longo do ano (Figura 8). A média histórica regional da precipitação pluvial é 1169, 1435 e 1644 mm em MG, SP e PR, respectivamente. De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013), nas áreas da região MG predomina o clima tropical com estação seca de inverno (Aw); nas de SP predomina o clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente (Cwa); no PR predominam os climas subtropical úmido sem estação seca, com verão quente ou temperado (Cfa, Cfb). As áreas encontram-se em faixas altimétricas semelhantes: em MG as altitudes variam de 535 a 985 m; em SP, de 505 a 895 m, e no PR, de 625 a 994 m.

Constatou-se, mediante a análise da função discriminante (Capítulo 2, seção 2.3.7), que as três regiões possuem características ambientais diferentes, principalmente em relação à temperatura média anual, a evapotranspiração potencial e ao número de meses com déficit hídrico acima de 10 mm, o que permite classificá-las como estratos climáticos diferentes.

3.2.2. Características geológicas e edáficas

Em Minas Gerais, as áreas encontram-se na Bacia do rio São Francisco, com uma geologia muito diversificada e antiga (era Neoproterozoica). A litologia é embasada por arenitos e siltitos do Grupo Bambuí e por sedimentos areno-siltosos de depósitos colúvio-eluviais e sedimentos argilo-arenosos que constituem coberturas detrito-lateríticas (Paim e Cunha, 2018; CPRM, 2012). Os tipos de solos predominantes na região são os Latossolos e os Argissolos distróficos e distroférricos, além dos Cambissolos háplicos e dos Neossolos Litólicos e Quartzarênicos (Silva e Rosa, 2009).

Em São Paulo, as áreas de estudo localizam-se na porção nordeste da Bacia Sedimentar do rio Paraná. A maior parte delas, em setores onde predominam as formações Piramboia e Botucatu, de litologia arenítica e granulometria de fina a grossa, interpretadas como depósitos residuais de dunas eólicas (CPRM, 2006). Em outras áreas, o material de origem pertence à formação Serra Geral, caracterizada pela presença de rochas ígneas básicas (CPRM, 2006). Nessa região, os Neossolos Quartzarênicos e os Latossolos e os Argissolos distróficos, arênicos e espessarênicos, são os tipos predominantes.

No Paraná, as áreas também se localizam na Bacia do rio Paraná, onde ocorre a o Grupo Itararé Indiviso, caracterizado como um conjunto heterogêneo de rochas sedimentares de origem glacio-marinha, incluindo arenitos, argilitos, diamictitos, siltitos, tilitos, folhelhos, varvitos, ritmitos e conglomerados (CPRM, 2004). É comum a presença de diques básicos em geral, incluindo basaltos, diabásios, gabros e dioritos, associados à Formação Serra Geral (CPRM, 2004; Governo do Paraná, 2005). Predominam os tipos de solo Latossolos distróficos e Cambissolos háplicos (Embrapa, 2007).

Percebem-se diferenças importantes em relação aos atributos químicos e físicos dos solos predominantes nas três regiões (Tabela 10). Em MG predominam solos de argilosos a muito argilosos, em SP predominam solos arenosos e de textura média arenosa, enquanto, no PR é mais frequente a ocorrência de solos de textura média argilosa a argilosa. Os maiores teores de bases trocáveis e de matéria orgânica observam-se no PR, entanto os maiores teores de P disponível em SP.

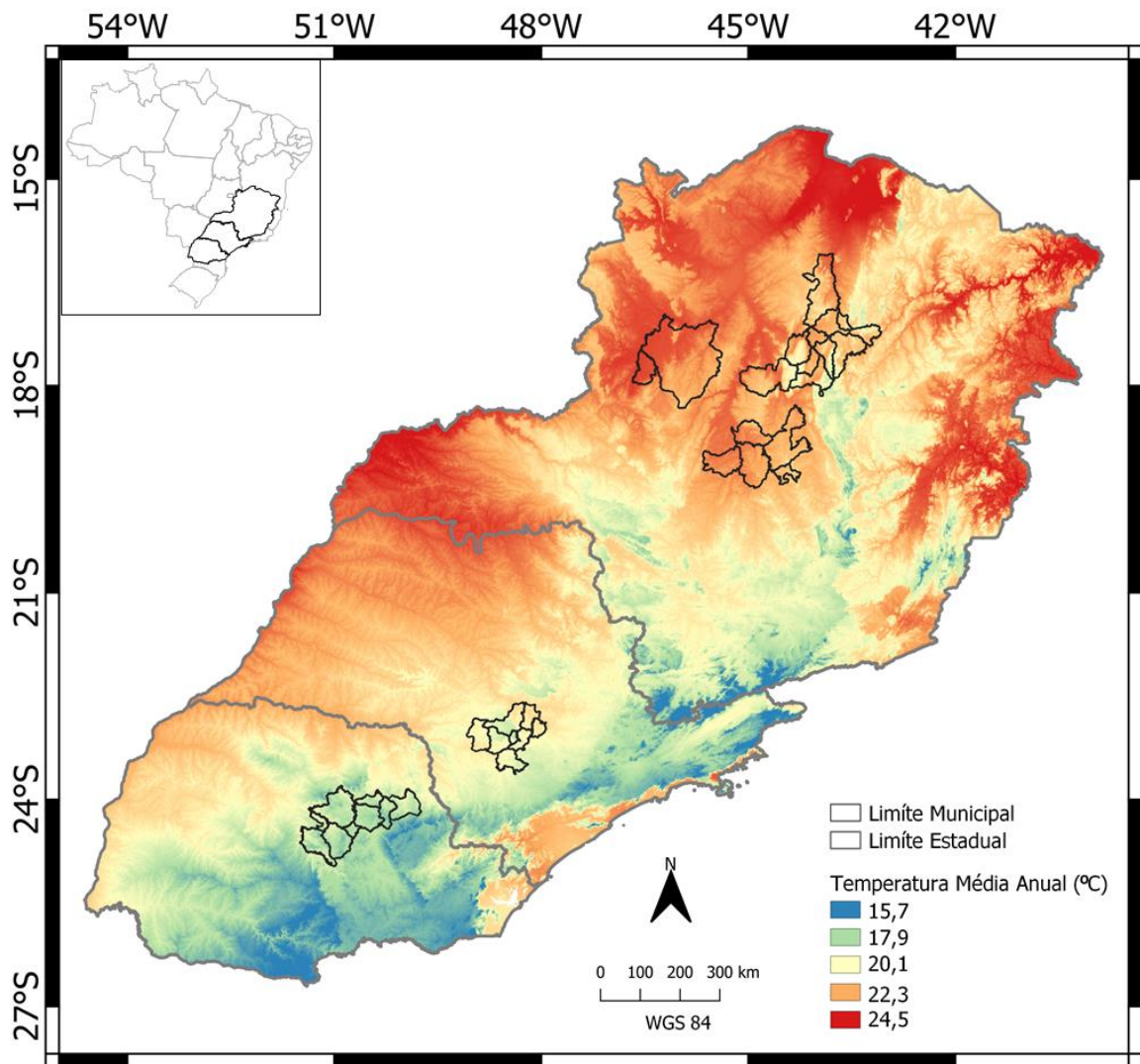


Figura 7. Mapa da temperatura média anual (°C) dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná (Fick & Hijmans, 2017) e limite dos municípios onde se encontram localizadas as áreas de estudo (427 plantações do clone AEC144, *E. urophylla*).

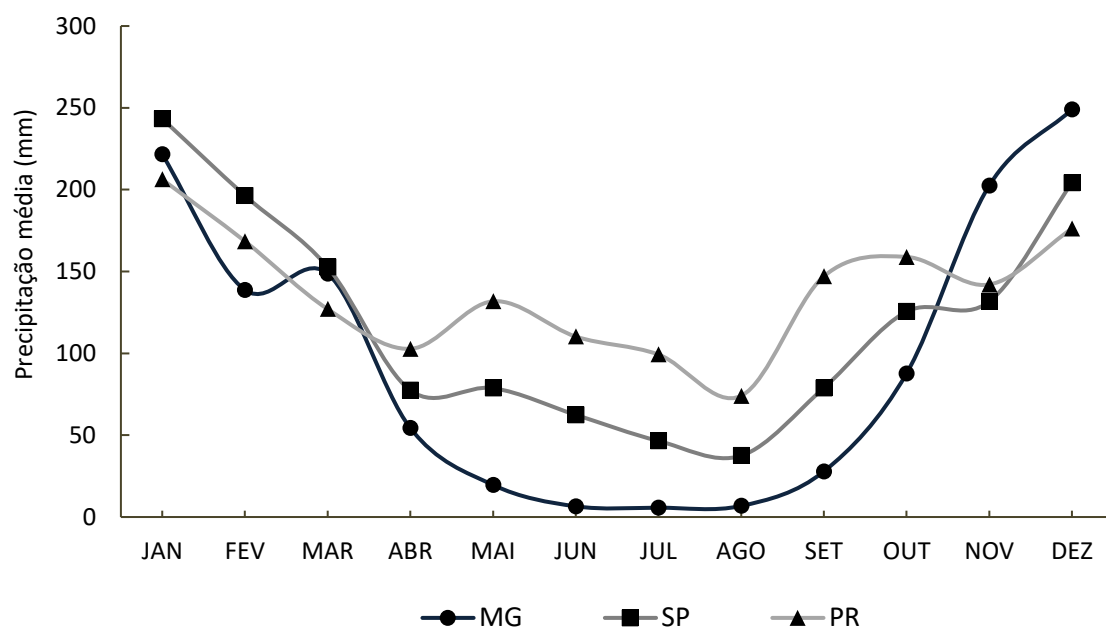


Figura 8. Precipitação pluvial nas regiões MG, SP e PR. Valores médios obtidos das séries históricas de estações meteorológicas da rede pública (ANA e INMET) próximas aos plantios em cada região.

Tabela 10. Características químicas e físicas dos solos na profundidade de 0 a 20 cm em MG, SP e PR.

	pH ⁽¹⁾	MOS ⁽²⁾ g dm ⁻³	P ⁽³⁾ mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	CTC	Argila
				----- mmol _c dm ⁻³ -----				g kg ⁻¹
MG								
Mínimo	4,1	1,1	0,2	0,2	0,1	0,1	18,5	40
Média	4,7	13,0	1,0	0,8	2,2	1,2	62,5	482
Máximo	5,3	32,9	9,3	4,5	18,1	8,5	169,7	800
CV (%)	5,2	56,5	115,1	94,6	171,7	117,8	49,9	49,7
SP								
Mínimo	3,8	2,0	0,3	0,1	2,0	1,0	9,5	38 ⁽⁴⁾
Média	4,3	13,3	3,3	0,5	7,8	4,1	47,0	144 ⁽⁴⁾
Máximo	5,8	51,0	15,8	4,2	39,0	22,0	145,5	420 ⁽⁴⁾
CV (%)	7,9	73,2	107,0	112,2	87,0	90,9	57,1	76,7
PR								
Mínimo	3,6 ⁽⁴⁾	13,5	0,7	0,2	1,0	1,0	67,7	130
Média	3,8 ⁽⁴⁾	28,4	2,6	1,9	9,0	3,8	133,9	374
Máximo	4,0 ⁽⁴⁾	45,0	4,3	3,2	42,5	20,5	211,5	615
CV (%)	3,0	27,6	30,7	67,7	112,3	109,2	26,2	35,1

⁽¹⁾ CaCl₂ 0,01 mol l⁻¹; ⁽²⁾ Oxidação via úmida; ⁽³⁾ Extrator Mehlich; ⁽⁴⁾ Valores obtidos nas 14 parcelas caracterizadas no Capítulo 2 para cada região.

3.2.3. Conformação do banco de dados

Criou-se um banco de dados contendo teores de nutrientes nas folhas e parâmetros de crescimentos das árvores, provenientes do monitoramento nutricional e de inventários qualitativos de plantações comerciais de eucalipto. Do banco com informações de mais de 20.000 talhões, foram escolhidas, exclusivamente, plantações do clone AEC144, entre 12 e 24 meses de idade. Selecionaram-se, ao todo, 427 talhões, que conformam uma superfície aproximada de 10.000 ha. Essas plantações, estabelecidas entre os anos 2012 e 2016, foram manejadas com alto padrão tecnológico. Os tratos silviculturais e as doses mínimas e máximas de nutrientes aplicadas via fertilizantes encontram-se descritos na seção 2.2.1.

A metodologia de amostragem de folhas para a análise nutricional foi semelhante nas três empresas. De forma geral, consistiu em coletar folhas recém-maduras de 4 ramos por árvore, cortando-se 1 ramo em cada ponto cardeal (norte, sul, leste, oeste), entre os terços médio e superior das árvores. Amostraram-se, em média, de 10 a 20 árvores por talhão. Formou-se uma amostra composta com todas as folhas coletadas no talhão para determinar os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Mn e Fe, mediante análises de rotina em laboratório. Na amostragem consideraram-se apenas árvores saudias, não suprimidas e distantes de carregadores e de estradas. Junto à coleta de folhas mediu-se a altura das árvores. Mediante análises gráficas (Box-Plot) das bases de dados originais, identificaram-se dados (teores foliares) discrepantes, com pouco ou nenhum significado biológico, que pudessem ser derivados de erros de análises laboratoriais, ou de digitação. Tais informações foram excluídos para a conformação das bases de dados consolidadas, das quais, posteriormente, se derivaram os valores de referência para a diagnose nutricional.

3.2.4. Caracterização das populações

Em cada região foram definidas três subpopulações, de acordo com o crescimento em altura corrigida pela idade (IMAH, em $m \text{ ano}^{-1}$). São elas: a) de alta produtividade, conformada pelos plantios com valores de IMAH superiores à média mais meio desvio padrão ($\bar{Y} + 0,5s$); b) de baixa produtividade, conformada por plantios com IMAH inferior à média menos meio desvio padrão ($\bar{Y} - 0,5s$); c) de média produtividade, conformada pelos plantios com produtividade entre $\bar{Y} - 0,5s$ e $\bar{Y} + 0,5s$.

Embora o incremento médio anual em volume de madeira (IMAV) seja a variável mais utilizada para representar a produtividade do eucalipto, não foi possível estimar tal variável no PR, pois as bases de dados utilizadas apenas possuíam informações da altura das árvores. No entanto confirmou-se uma alta correlação entre o IMAH e o IMA em SP ($r=0,75$) e em MG ($r=0,80$), sugerindo que a altura corrigida pela idade é um bom parâmetro de crescimento das florestas na faixa etária e nas condições de espaçamento estudadas. Ainda, foram determinadas faixas de suficiência em MG e SP, pelo método da Chance Matemática (ver próxima seção), empregando-se o volume das árvores na conformação da

população de referência, obtendo valores de faixas normais dos nutrientes muito semelhantes (dados não apresentados) àqueles obtidos usando o IMAH. Outros autores também empregaram com sucesso a altura das árvores corrigida pela idade como parâmetro de produtividade para o estabelecimento de normas nutricionais na cultura do eucalipto (Lourenço, 2012; Fernandes, 2010).

3.2.5. Obtenção de faixas de suficiência pela Chance Matemática

Foram determinadas as faixas de suficiência para cada região (MG, SP, PR) e para o conjunto geral de dados (Gerais), mediante o método da Chance Matemática (Wadt, 1998). Com esse propósito, ordenaram-se os teores foliares de maneira crescente e distribuíram-se num número de classes igual à raiz quadrada do número de observações ($n^{0.5}$). Os limites de cada classe foram determinados dividindo-se a amplitude dos teores do nutriente em questão pelo número de classes. Para cada classe de nutriente, calculou-se a chance matemática, conforme a Equação 5.

$$\text{ChM}_i = (\text{ChM}(A_i/A) \times \text{ChM}(A_i/C_i))^{0.5} \quad (\text{Eq.5})$$

Em que:

$$\text{ChM}(A_i/A) = P(A_i/A) \times \text{IMAH}_i$$

$$\text{ChM}(A_i/C_i) = P(A_i/C_i) \times \text{IMAH}_i$$

E que:

- ChM_i = chance matemática (m ano^{-1}) na classe “i”,
- $P(A_i/A)$ = frequência de talhões de alta produtividade na classe “i”, em relação ao total de talhões de alta produtividade ($A = \sum A_i$),
- $P(A_i/C_i)$ = frequência de talhões de alta produtividade na classe “i”, em relação ao total de talhões da classe “i”,
- IMAH_i = crescimento médio em altura (m ano^{-1}) das árvores dos talhões de alta produtividade na classe “i”.

Logo, dividiu-se a ChM de cada classe pelo maior valor de ChM do nutriente e multiplicou-se por 100, para ser obtida a Chance Matemática Relativa (ChMR) (Fernandes, 2010). Para cada nutriente, a faixa “normal” foi conformada pelo limite inferior (LI) da primeira classe “i” de teores foliares em que a ChMR foi igual ou maior a 60%, e pelo limite superior (LS) da última classe “i” de teores foliares em que a ChMR foi igual ou superior a 60% (Wadt et al., 2013; Almeida et al., 2016). O limite inferior da faixa normal é também o “nível crítico” (NC) do teor foliar do nutriente. Esses procedimentos, modificam a proposta original de Wadt (1996), que, para a definição das faixas de suficiência, leva em

conta somente as duas classes de teores foliares com maior valor de ChM, o que conduz, no geral, à obtenção de faixas muito estreitas e excessiva sensibilidade nos diagnósticos.

3.2.6. Obtenção de faixas de suficiência pela Linha da Fronteira

Para aplicar o método da Linha da Fronteira, relacionaram-se os teores de nutrientes nas folhas a seus respectivos valores de IMAH, mediante gráficos de dispersão. Da nuvem de pontos gerada para cada nutriente, selecionaram-se pares de dados na região superior para ajustar um modelo quadrático de regressão que permitisse delimitar a linha que encerra a nuvem de pontos, denominada linha da fronteira (Walworth et al., 1986).

Usando as mesmas classes de teores foliares empregadas no método da Chance Matemática, selecionaram-se os pares de dados (x =teor foliar, y =IMAH) com o maior valor de IMAH dentro de cada classe (Blanco-Mazias et al., 2010). De acordo com procedimento descrito por Souza et al. (2020), as classes eram excluídas quando não satisfaziam os seguintes critérios:

a) Nas classes antecedentes à classe que continha o maior valor absoluto de IMAH:

$$Y_{\max_i} > Y_{\max_{i-1}} \quad (\text{Eq.6})$$

b) Nas classes posteriores à classe que continha o maior valor absoluto de IMAH:

$$Y_{\max_i} > Y_{\max_{i+1}} \quad (\text{Eq.7})$$

Em que, Y_{\max_i} corresponde ao maior valor de produtividade (IMAH) observado na classe “ i ” de teores foliares do nutriente em questão, e $Y_{\max_{i-1}}$ e $Y_{\max_{i+1}}$ são os maiores valores de produtividade das classes adjacentes à classe “ i ” (anterior e posterior, respectivamente).

A partir dos pontos selecionados ajustaram-se funções polinomiais de segundo grau (Equação 8), mediante o uso do programa Sigmaplot 11.

$$Y = aX^2 + bX + c \quad (\text{Eq.8})$$

Em que Y é o crescimento em altura (IMAH); X é o teor foliar do nutriente; e a , b , e c , são os coeficientes da equação de regressão. Calculou-se o ponto máximo de cada função pela resolução da primeira derivada dela (Equação 9):

$$Y_{\max} = \frac{-b}{-2a} \quad (\text{Eq.9})$$

Em que a e b são os coeficientes da equação quadrática. Determinaram-se os limites inferior e superior das faixas de suficiência a partir dos teores foliares que correspondem a 95% da produtividade máxima estimada, obtidos ao resolver a equação quadrática pela fórmula de Bhaskara (Equação 10):

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{Eq.10})$$

Em que X é o teor foliar que corresponde a 95% da produtividade máxima e a , b e c são os coeficientes da equação quadrática. Dessa forma, determinaram-se faixas de suficiência específicas por região (MG, SP e PR) e para todo o conjunto de dados (Gerais). O limite inferior da faixa normal é também o “nível crítico” (NC) do teor foliar do nutriente.

3.2.7. Diagnósticos nutricionais a partir das faixas obtidas

Realizaram-se os diagnósticos nutricionais da população base de cada região usando as faixas de suficiência gerais e regionais, obtidas por ambos os métodos. Classificaram-se os teores nutricionais foliares como “deficientes”, quando inferiores ao limite inferior da faixa normal, como “adequados”, quando dentro dessa faixa, e “em excesso”, quando maiores que o limite superior da faixa. Posteriormente, calcularam-se as Frequências de Diagnósticos Concordantes (FDC) ao nível de talhão (Silva et al., 2004), comparando-se os diagnósticos obtidos em cada região, utilizando as faixas específicas da região em questão e as faixas gerais.

Para cada nutriente, calculou-se o IMAH médio dos talhões classificados em cada grupo de estado nutricional: deficiente, adequado e em excesso. Realizaram-se análises de variância e de comparação de médias entre os grupos, por meio do teste da diferença mínima significativa (LSD, na sigla em inglês), a um nível de significância de 5%, por meio do programa SAS® *On Demand* (SAS, 2016).

3.3. Resultados

3.3.1. Produtividade e teores foliares médios das populações

O crescimento em altura (IMAH) foi diferente entre as regiões, seguindo a sequência decrescente: SP > MG > PR (Tabela 11). Verificaram-se diferenças na média dos teores foliares, sendo esta diferença maior entre as regiões do que entre as subpopulações dentro de uma mesma região, exceto para o Cu e o Zn, que, em MG, apresentaram diferenças importantes entre subpopulações.

Em MG, observaram-se os maiores valores médios dos teores foliares de Ca, Cu, Fe e B, e os menores de N, P, K e Mg. Em SP, verificaram-se os maiores teores médios de N e Mg, e os menores teores de Ca, S, Zn e Mn. No PR, observaram-se os maiores teores médios de P, K, S, Zn e Mn, e os menores de Cu, Fe e B.

Os coeficientes de variação dos teores foliares foram menores nas subpopulações de alta produtividade, exceto para o Ca, S, Cu, Fe e B em MG. De modo geral, observaram-se maiores coeficientes de variação para os micronutrientes do que para os macronutrientes. Constatou-se a menor variabilidade dos teores foliares no PR e a maior variabilidade em MG.

3.3.2. Faixas de suficiência pela Chance Matemática Relativa

Para o N, em MG, a primeira e a última classes de teores foliares com ChMR $\geq 60\%$ foram, respectivamente, a 4 e a 9 (Tabela 12), indicando que a faixa normal de teores foliares do nutriente nessa região encontrou-se entre 15,6 (limite inferior da primeira classe) e 21,9 g kg⁻¹ (limite superior da última classe). Em SP, a faixa normal foi definida pelo limite inferior da classe 4 = 22,3 g kg⁻¹ e pelo limite superior da classe 11 = 32,4 g kg⁻¹. Já no PR, a faixa normal foi definida pelas classes 5 a 8, situando-se entre 20,1 e 24,6 g kg⁻¹. Analisando os dados das três regiões de maneira conjunta, notou-se que a faixa normal de N foi definida pelas classes 5 a 14, com limites inferior = 18,5 e superior = 33,5 g kg⁻¹, apresentando maior amplitude em comparação às faixas regionais. De maneira semelhante, a partir dos valores de chance matemática apresentados nas Tabelas A6 a A9, determinaram-se as faixas normais dos teores foliares dos nutrientes por região e para todo o conjunto de dados (geral) (Tabela 13).

Para a maioria dos nutrientes, observaram-se diferenças importantes entre as regiões quanto aos limites e à amplitude das faixas normais obtidas pela ChMR (Tabela 13). Em MG os níveis críticos (limite inferior da faixa normal) mostraram-se menores que os das outras regiões, exceto para B e S. Por sua vez, SP apresentou os maiores níveis críticos para N, Mg e Cu, enquanto o PR os maiores níveis críticos para K, Ca, S, Zn e Mn. O nível crítico de P foi igual em SP e PR. Em termos relativos, as faixas Gerais apresentaram maior amplitude do que as regionais. A média dos quocientes entre os limites superiores e inferiores das faixas normais dos nutrientes foi 2,84 para as faixas Gerais, 2,24 para MG, 1,91 para São Paulo e 1,83 para o Paraná.

Tabela 11. Média, mínima, máxima e coeficiente de variação (%) do crescimento em altura (IMAH, m ano⁻¹) e dos teores foliares de macro (g kg⁻¹) e micronutrientes (mg kg⁻¹), nas populações de alta, média e baixa produtividade, em plantios do clone AEC144 de 12 a 24 meses de idade nas regiões MG, SP e PR.

Variável	----- Baixa produtividade -----				----- Média produtividade -----				----- Alta produtividade -----			
	Min.	Med.	Max.	CV	Min.	Med.	Max.	CV	Min.	Med.	Max.	CV
MG												
IMAH	3,8	5,3	5,8	8,1	5,9	6,5	6,9	4,6	7,0	7,7	9,1	6,5
N	12,5	18,9	25,0	18,3	12,5	18,5	25,0	15,6	13,2	18,5	23,0	13,8
P	0,6	0,9	1,3	19,2	0,7	0,9	1,2	15,8	0,6	0,9	1,3	16,9
K	3,4	6,2	11,2	29,1	3,5	6,3	10,6	29,9	3,3	7,7	10,8	29,4
Ca	3,4	7,9	13,2	30,5	3,6	8,0	12,8	29,1	3,2	7,1	11,6	34,2
Mg	1,7	2,3	2,9	12,5	1,6	2,3	2,9	14,7	1,7	2,2	2,9	13,5
S	1,0	1,3	1,5	10,5	1,0	1,3	1,5	10,4	1,0	1,2	1,5	10,9
Cu	3,4	15,3	21,1	29,2	3,1	14,1	20,4	36,6	3,1	9,0	21,1	70,8
Fe	34,5	152,2	244,6	37,9	41,3	144,2	240,6	40,5	45,2	119,9	253,1	48,6
Zn	2,4	10,6	23,7	52,0	3,1	10,9	23,1	39,3	5,2	12,3	22,0	22,9
Mn	120	574	1.055	44,2	110	460	1.032	52,5	107	368	629	36,2
B	21,5	53,7	101,8	35,1	18,5	56,3	108,7	46,1	20,5	47,4	108,7	46,8
SP												
IMAH	4,7	6,0	6,6	8,4	6,6	7,1	7,7	4,1	7,7	8,5	10,5	8,3
N	18,5	26,1	35,0	15,5	18,5	25,6	33,6	14,5	22,4	27,9	33,2	11,7
P	0,9	1,3	1,8	16,4	0,9	1,3	1,8	15,0	1,0	1,4	1,8	13,8
K	6,8	9,6	12,0	15,3	6,0	9,0	12,3	19,0	7,3	9,3	12,3	11,9
Ca	2,8	4,7	7,0	22,2	2,8	4,8	7,8	21,2	3,8	5,5	8,0	14,1
Mg	2,0	2,7	3,5	13,8	2,1	2,9	3,8	14,9	2,5	3,0	3,7	8,9
S	0,4	1,2	2,2	37,5	0,3	1,2	2,4	44,2	0,6	1,4	2,3	33,3
Cu	4,0	8,6	18,7	47,6	4,0	11,1	18,5	31,6	5,0	8,9	15,5	28,9
Fe	20,0	89,0	163,5	38,9	19,9	89,8	160,0	38,1	30,0	101,7	170,0	36,4
Zn	9,5	21,1	39,9	34,1	9,7	23,1	39,0	28,5	13,3	22,4	38,0	26,9
Mn	120,9	435,5	849,5	48,6	60,0	383,9	898,0	51,4	80,0	367,4	806,1	49,4
B	21,0	49,2	80,7	30,8	11,9	45,0	83,5	34,5	12,9	40,6	76,8	31,5
PR												
IMAH	3,1	4,6	5,4	14,9	5,4	6,0	6,4	4,7	6,5	7,0	8,1	6,3
N	16,0	22,3	28,0	14,7	16,0	22,1	27,0	15,1	15,7	21,7	27,0	11,8
P	1,0	1,8	2,5	27,9	0,9	1,7	2,8	25,7	0,8	1,9	2,7	25,1
K	6,8	12,5	18,0	24,0	6,0	11,7	18,0	25,2	8,0	12,4	18,1	20,5
Ca	4,3	7,4	12,0	31,6	3,9	7,2	12,0	26,4	5,2	7,6	12,6	21,4
Mg	1,7	2,6	3,7	19,6	1,5	2,5	3,9	25,1	1,6	2,7	3,9	20,0
S	1,2	1,5	2,2	16,9	1,1	1,6	2,1	16,2	1,1	1,7	2,1	14,6
Cu	4,0	7,3	10,0	20,3	4,0	6,7	10,0	22,3	4,0	7,5	10,0	19,5
Fe	35,0	63,7	105,0	23,4	30,0	68,1	118,0	35,7	43,0	73,5	117,0	25,3
Zn	12,0	19,4	30,0	29,3	9,0	18,5	27,0	23,9	10,0	19,8	30,0	22,8
Mn	89	716	1.700	53,4	89	775	1.800	58,3	199	863	1.800	47,7
B	18,0	30,8	51,0	28,7	13,0	29,3	50,0	32,7	16,0	27,3	49,0	28,5

Tabela 12. Valores de chance matemática das classes de teor de N nas folhas obtidos para MG, SP, PR e para todo o conjunto de dados (Geral).

Classe _i	LI _i ⁽¹⁾	LS _i ⁽¹⁾	N _i ⁽²⁾	A _i ⁽²⁾	P(A _i /A) ⁽²⁾	P(A _i /N _i) ⁽²⁾	IMAH _i ⁽²⁾	ChM _i ⁽²⁾	Tm _i ⁽³⁾	ChM _i R ⁽⁴⁾
MG										
1	12,5	13,5	5	1	0,020	0,200	7,07	0,45	13,0	18,2
2	13,5	14,6	7	2	0,041	0,286	7,63	0,82	14,1	33,2
3	14,6	15,6	11	4	0,082	0,364	7,68	1,32	15,1	53,3
4	15,6	16,7	22	7	0,143	0,318	7,54	1,61	16,1	64,8
5	16,7	17,7	15	4	0,082	0,267	7,38	1,09	17,2	43,9
6	17,7	18,8	15	5	0,102	0,333	7,31	1,35	18,2	54,4
7	18,8	19,8	16	9	0,184	0,563	7,72	2,48	19,3	100,0
8	19,8	20,8	14	8	0,163	0,571	7,65	2,34	20,3	94,2
9	20,8	21,9	13	5	0,102	0,385	7,88	1,56	21,4	63,0
10	21,9	22,9	12	3	0,061	0,250	7,83	0,97	22,4	39,1
11	22,9	24,0	8	1	0,020	0,125	7,39	0,37	23,4	15,1
12	24,0	25,0	5	0	0,000	0,000	0,00	0,00	24,5	0,0
SP										
1	18,5	19,7	11	0	0,000	0,000	0,00	0,00	19,1	0,0
2	19,7	21,0	5	0	0,000	0,000	0,00	0,00	20,4	0,0
3	21,0	22,3	7	0	0,000	0,000	0,00	0,00	21,6	0,0
4	22,3	23,5	20	5	0,122	0,250	8,15	1,42	22,9	59,9
5	23,5	24,8	14	5	0,122	0,357	7,91	1,65	24,2	69,6
6	24,8	26,1	27	3	0,073	0,111	8,95	0,81	25,5	34,0
7	26,1	27,4	19	6	0,146	0,316	8,97	1,93	26,7	81,2
8	27,4	28,6	18	4	0,098	0,222	8,74	1,29	28,0	54,2
9	28,6	29,9	14	3	0,073	0,214	9,01	1,13	29,3	47,5
10	29,9	31,2	13	6	0,146	0,462	8,80	2,29	30,5	96,3
11	31,2	32,4	14	7	0,171	0,500	8,12	2,37	31,8	100,0
12	32,4	33,7	4	2	0,049	0,500	7,93	1,24	33,1	52,2
13	33,7	35,0	3	0	0,000	0,000	0,00	0,00	34,3	0,0
PR										
1	15,7	16,8	5	2	0,054	0,400	6,50	0,96	16,2	38,0
2	16,8	17,9	5	1	0,027	0,200	7,26	0,53	17,3	21,2
3	17,9	19,0	14	3	0,081	0,214	7,30	0,96	18,5	38,3
4	19,0	20,1	9	2	0,054	0,222	6,93	0,76	19,6	30,2
5	20,1	21,3	11	6	0,162	0,545	7,06	2,10	20,7	83,5
6	21,3	22,4	21	10	0,270	0,476	7,01	2,52	21,8	100,0
7	22,4	23,5	14	5	0,135	0,357	7,01	1,54	23,0	61,2
8	23,5	24,6	12	5	0,135	0,417	7,05	1,67	24,1	66,5
9	24,6	25,8	2	0	0,000	0,000	0,00	0,00	25,2	0,0
10	25,8	26,9	6	1	0,027	0,167	6,73	0,45	26,3	18,0
11	26,9	28,0	14	2	0,054	0,143	6,71	0,59	27,4	23,4
GERAL										
1	12,5	14,0	6	0	0,000	0,000	0,00	0,00	13,3	0,0
2	14,0	15,5	17	6	0,045	0,353	7,66	0,97	14,7	50,9
3	15,5	17,0	29	5	0,038	0,172	7,78	0,63	16,2	33,0
4	17,0	18,5	39	7	0,053	0,179	7,49	0,73	17,7	38,3
5	18,5	20,0	37	12	0,091	0,324	7,68	1,32	19,2	69,1
6	20,0	21,5	51	13	0,098	0,255	7,79	1,23	20,7	64,7
7	21,5	23,0	48	12	0,091	0,250	7,88	1,19	22,2	62,3
8	23,0	24,5	59	18	0,136	0,305	7,60	1,55	23,7	81,3
9	24,5	26,0	30	9	0,068	0,300	7,88	1,13	25,2	59,1
10	26,0	27,5	43	14	0,106	0,326	8,12	1,51	26,7	79,2
11	27,5	29,0	23	10	0,076	0,435	8,10	1,47	28,2	77,1
12	29,0	30,5	14	10	0,076	0,714	8,20	1,91	29,7	100,0
13	30,5	32,0	15	10	0,076	0,667	7,88	1,77	31,2	92,9
14	32,0	33,5	10	6	0,045	0,600	8,14	1,34	32,7	70,5
15	33,5	35,0	4	0	0,000	0,000	0,00	0,00	34,2	0,0

⁽¹⁾ Limites Inferior e Superior da classe i; ⁽²⁾ Parâmetros da Equação 5; ⁽³⁾ Teor foliar médio de N na classe i; ⁽⁴⁾ Chance matemática relativa da classe i (em negrito destacam-se as ChM_iR das classes que conformam a faixa de suficiência).

Tabela 13. Faixas normais e níveis críticos⁽¹⁾ dos teores de macro (g kg^{-1}) e de micronutrientes (mg kg^{-1}) nas folhas de plantios jovens (12 a 24 meses de idade) do clone AEC144 (*E. urophylla*), obtidas pelos métodos da Chance Matemática Relativa para as regiões MG, SP, PR e para todo o conjunto de dados (Geral).

Nutriente	MG	SP	PR	GERAL
N	16 - 22	22 - 32	20 - 25	18 - 33
P	0,7 - 1,0	1,2 - 1,7	1,2 - 2,4	0,7 - 1,8
K	7,9 - 10,6	7,9 - 10,8	9,3 - 15,9	7,3 - 11,2
Ca	3,2 - 10,7	4,8 - 6,8	5,5 - 9,4	4,1 - 6,2
Mg	1,8 - 2,3	2,8 - 3,2	2,0 - 3,7	1,8 - 3,6
S	1,0 - 1,4	0,9 - 2,4	1,5 - 2,1	1,0 - 2,4
Cu	3,1 - 7,6	6,2 - 9,6	5,6 - 10,0	3,1 - 22,1
Fe	35 - 89	55 - 170	54 - 102	35 - 129
Zn	9 - 17	14 - 28	15 - 24	10 - 35
Mn	107 - 581	189 - 382	400 - 1333	176 - 640
B	26 - 56	23 - 45	20 - 30	26 - 51

⁽¹⁾ O nível crítico é igual ao limite inferior da faixa normal.

3.3.3. Faixas de suficiência pela Linha da Fronteira

A partir dos diagramas de dispersão que relacionam o crescimento em altura (IMAH) a os teores foliares dos nutrientes, foi possível selecionar os pontos da região superior da relação, de modo a ajustar equações quadráticas que definiram as linhas da fronteira com altos níveis de significância ($p < 0,05$) e coeficientes de determinação variando entre 0,51 e 0,98 (Tabela 14). Somente para Cu e Zn no PR e para Mg no conjunto geral de dados, não se obtiveram modelos com nível de significância aceitável ($p > 0,1$).

Na Figura 9, apresentam-se os diagramas de dispersão para o N, nas três regiões e para todo o conjunto de dados, bem como as linhas da fronteira e as faixas normais obtidas a partir da resolução das equações para 95% do IMAH máximo estimado. Dessa mesma forma, obtiveram-se as faixas normais dos demais nutrientes. A relação entre os teores foliares e o crescimento em altura, assim como as linhas da fronteira, são apresentados nas Figuras A1 a A8 para todos os nutrientes.

Da mesma forma que no método da Chance Matemática, pela Linha da Fronteira observaram-se diferenças importantes entre regiões quanto aos limites inferiores e superiores e à amplitude das faixas normais (Tabela 15). Em MG, notaram-se os menores níveis críticos para N, P, K, Mg, Zn e Mn, e os maiores níveis críticos para B e Cu. Em SP, foram observados os menores níveis críticos para S e B e os maiores para N, K, Mg, Fe e Zn. Já no PR, verificaram-se os menores níveis críticos para Cu, e os maiores para P, Ca, S e Mn. A média dos quocientes entre os limites superiores e inferiores das faixas normais dos nutrientes foi 2,11 nas faixas gerais, 2,39 em MG, 1,86 em SP e 1,78 no PR.

Tabela 14. Equações de regressão que definem as linhas da fronteira da relação entre o IMAH (Y) e os teores de macro (g kg⁻¹) e micronutrientes (mg kg⁻¹) em MG, SP, PR e no conjunto geral de dados.

Nutriente	Equação	R ²	Valor p
MG			
N	Y = -15,989 + 2,683 N - 0,0717 N ²	0,904	0,002
P	Y = -8,036 + 36,605 P - 19,467 P ²	0,912	0,010
K	Y = 0,672 + 2,422 K - 0,166 K ²	0,775	0,032
Ca	Y = 3,319 + 1,461 Ca - 0,0924 Ca ²	0,662	0,078
Mg	Y = -6,646 + 13,411 M - 2,872 Mg ²	0,935	0,006
S	Y = -20,371 + 45,353 S - 17,631 S ²	0,829	0,009
Cu	Y = 6,429 + 0,565 Cu - 0,0235 Cu ²	0,972	0,028
Fe	Y = 7,413 + 0,0289 Fe - 0,000118 Fe ²	0,958	0,002
Zn	Y = 5,116 + 0,489 Zn - 0,0190 Zn ²	0,791	0,005
Mn	Y = 7,805 + 0,00417 Mn - 0,00000555 Mn ²	0,844	0,014
B	Y = 7,051 + 0,0528 B - 0,000471 B ²	0,890	0,040
SP			
N	Y = -30,029 + 2,998 N - 0,0558 N ²	0,956	<0.001
P	Y = -15,315 + 38,875 P - 14,577 P ²	0,775	0,058
K	Y = -10,529 + 4,190 K - 0,211 K ²	0,978	<0.001
Ca	Y = -0,109 + 3,300 Ca - 0,279 Ca ²	0,761	0,021
Mg	Y = -12,706 + 13,686 Mg - 2,047 Mg ²	0,980	<0.001
S	Y = 5,567 + 5,394 S - 1,867 S ²	0,802	0,004
Cu	Y = 6,404 + 0,663 Cu - 0,0361 Cu ²	0,619	0,034
Fe	Y = 5,603 + 0,0931 Fe - 0,000428 Fe ²	0,983	0,003
Zn	Y = 1,200 + 0,744 Zn - 0,0148 Zn ²	0,957	0,003
Mn	Y = 7,345 + 0,0127 Mn - 0,0000140 Mn ²	0,966	<0.001
B	Y = 7,734 + 0,0916 B - 0,00122 B ²	0,618	0,049
PR			
N	Y = -11,341 + 1,823 N - 0,0426 N ²	0,908	0,011
P	Y = 0,754 + 7,881 P - 2,085 P ²	0,690	0,065
K	Y = 4,834 + 0,544 K - 0,0243 K ²	0,768	0,035
Ca	Y = 1,104 + 1,716 Ca - 0,108 Ca ²	0,831	0,017
Mg	Y = 0,210 + 5,279 Mg - 0,898 Mg ²	0,868	0,022
S	Y = -6,702 + 18,294 S - 5,577 S ²	0,903	0,093
Cu	Y = 3,834 + 1,247 Cu - 0,0931 Cu ²	0,716	0,254
Fe	Y = 2,784 + 0,146 Fe - 0,000927 Fe ²	0,953	0,046
Zn	Y = 4,039 + 0,410 Zn - 0,0104 Zn ²	0,672	0,113
Mn	Y = 5,939 + 0,00396 Mn - 0,00000191 Mn ²	0,839	0,032
B	Y = 3,067 + 0,291 B - 0,00414 B ²	0,888	0,041
GERAL			
N	Y = -3,564 + 1,104 N - 0,0228 N ²	0,805	0,002
P	Y = 3,865 + 8,684 P - 3,313 P ²	0,738	0,010
K	Y = 4,048 + 1,196 K - 0,0640 K ²	0,832	0,001
Ca	Y = 1,647 + 2,329 Ca - 0,154 Ca ²	0,907	0,002
Mg	Y = -0,734 + 7,512 Mg - 1,337 Mg ²	0,510	0,128
S	Y = 4,566 + 7,122 S - 2,455 S ²	0,815	0,011
Cu	Y = 7,214 + 0,510 Cu - 0,0228 Cu ²	0,716	0,054
Fe	Y = 6,385 + 0,0612 Fe - 0,000255 Fe ²	0,814	0,011
Zn	Y = 4,753 + 0,495 Zn - 0,0118 Zn ²	0,851	<0.001
Mn	Y = 8,016 + 0,00663 Mn - 0,00000670 Mn ²	0,764	0,012
B	Y = 7,619 + 0,0914 B - 0,00118 B ²	0,711	0,022

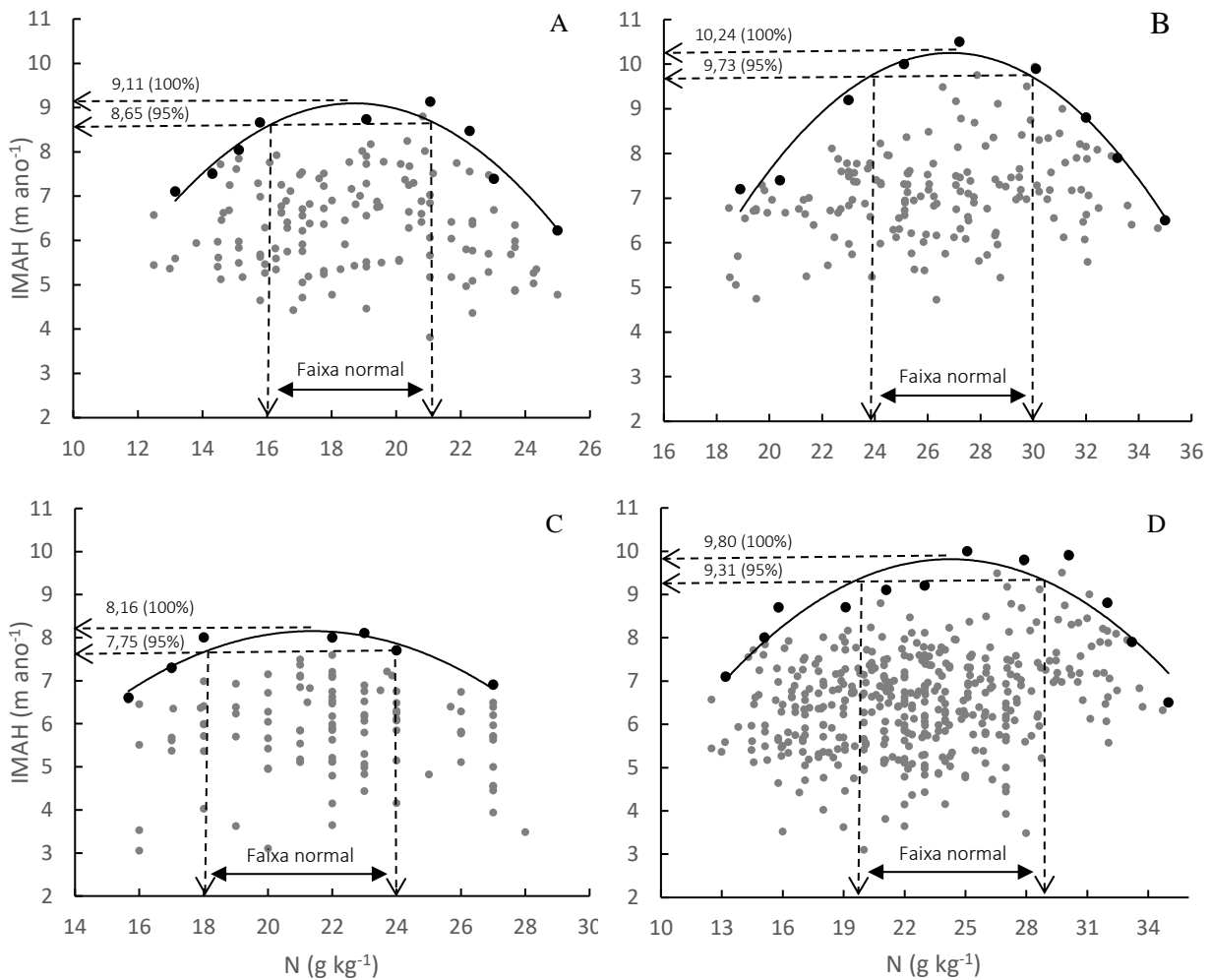


Figura 9. Relação entre os teores foliares de nitrogênio (N) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em MG (A), SP (B), PR (C) e para o todo o conjunto de dados (D); linhas da fronteira e pontos selecionados para ajustar as equações de regressão (Tabela 14). As linhas tracejadas sinalizam os pontos da curva equivalentes a 100% e 95% da produtividade máxima estimada e os limites inferior e superior da faixa normal de nitrogênio.

3.3.4. Concordância nos diagnósticos nutricionais usando faixas regionais e gerais

A comparação entre os diagnósticos, realizados no nível de talhão, utilizando as faixas de suficiência regionais e gerais, mostrou frequências de diagnósticos concordantes (FDC, %) que variaram de 31 a 96% pela ChMR e de 26 a 98% pela LF (Tabela 16). Os menores valores de FDC média por nutriente entre faixas regionais e gerais, considerando os dois métodos, foram obtidos para o P (52%) e o Ca (53%), enquanto o maior valor foi obtido para o S (82%). Comparando a concordância entre os métodos, os maiores valores de FDC foram constatados para S (86%), N (84%) e Zn (82%), e os menores para Cu (61%) e K (69%) (Tabela 16).

De modo geral, observaram-se menores FDC na comparação entre faixas gerais e regionais derivadas do mesmo método, do que entre faixas obtidas por diferentes métodos para uma mesma região. Assumindo que valores de FDC $\geq 70\%$ indiquem um nível de concordância aceitável, nas comparações entre faixas regionais e gerais, verificaram-se somente 15 (45%) valores de FDC $\geq 70\%$ por ambos os métodos. Já nas comparações entre métodos para cada região, observaram-se 24 (73%) valores de FDC $\geq 70\%$.

Tabela 15. Faixas normais e níveis críticos⁽¹⁾ dos teores de macro (g kg^{-1}) e de micronutrientes (mg kg^{-1}) nas folhas de plantios jovens (12 a 24 meses de idade) do clone AEC144 (*E. urophylla*), obtidas pelo método da Linha da Fronteira para as regiões MG, SP, PR e para todo o conjunto de dados (Geral).

Nutriente	MG	SP	PR	GERAL
N	16 - 21	24 - 30	18 - 24	20 - 29
P	0,8 - 1,1	1,1 - 1,5	1,4 - 2,3	0,9 - 1,7
K	5,6 - 9,0	8,4 - 11,5	7,2 - 15,2	6,6 - 12,1
Ca	5,7 - 10,1	4,6 - 7,2	6,0 - 9,9	5,7 - 9,4
Mg	1,9 - 2,7	2,8 - 3,8	2,3 - 3,6	2,2 - 3,4
S	1,1 - 1,4	0,9 - 1,9	1,4 - 1,9	1,0 - 1,9
Cu	7,4 - 16,6	5,6 - 12,8	4,6 - 8,8	6,5 - 15,9
Fe	60 - 185	73 - 144	57 - 100	76 - 164
Zn	8 - 18	19 - 31	13 - 26	14 - 27
Mn	98 - 654	262 - 645	579 - 1494	226 - 763
B	26 - 86	18 - 57	25 - 45	19 - 59

⁽¹⁾ O nível crítico é igual ao limite inferior da faixa normal.

Tabela 16. Frequência (%) de talhões com diagnósticos concordantes (FDC) utilizando as faixas de suficiência Gerais em comparação às regionais (MG, SP e PR) obtidas pelos métodos da Chance Matemática Relativa (ChMR) e da Linha da Fronteira (LF), e FDC utilizando as faixas de suficiência de cada região por ambos os métodos.

Diagnósticos Contrastados	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	----- % -----										
MG ChMR vs. Geral ChMR	49	68	92	37	53	85	34	78	86	88	95
SP ChMR vs. Geral ChMR	85	63	85	67	40	96	31	70	77	65	82
PR ChMR vs. Geral ChMR	68	40	40	33	94	64	86	68	73	38	30
MG LF vs. Geral LF	40	53	67	92	62	79	92	80	37	79	65
SP LF vs. Geral LF	72	66	62	63	50	96	77	89	65	82	98
PR LF vs. Geral LF	76	22	62	93	94	74	52	55	95	39	59
Média (Regiões vs. Geral)	65	52	68	53	65	82	62	73	72	65	71
MG ChMR vs. MG LF	92	62	53	71	62	91	43	41	90	93	70
SP ChMR vs. SP LF	73	70	79	87	80	88	70	79	67	49	89
PR ChMR vs. PR LF	88	87	73	88	87	79	72	89	90	80	42
Média (ChMR vs. LF)	84	73	69	72	76	86	61	70	82	74	67

3.3.5. Produtividade por classe de estado nutricional

Na maioria dos casos, a produtividade média (IMAH) dos plantios com teores foliares classificados como adequados, foi maior do que a dos plantios com teores classificados como deficientes (Tabela 17). Essas diferenças foram significativas apenas para K e Zn em MG, pelos dois métodos. Em SP, para N, P, Ca, Mg e Cu pela LF, e para os mesmos nutrientes, além de S, pela ChMR. No PR, não se verificaram diferenças significativas em produtividade entre os plantios com teores classificados como deficientes e adequados.

Em MG, a produtividade dos plantios com teores de micronutrientes acima da faixa normal, obtida pela ChMR, foi significativamente menor que a dos plantios com teores adequados (Tabela 17). Entretanto, pela LF, somente houve diferenças significativas entre esses grupos para Zn e Mn. Em São Paulo, os talhões com teores de B acima da faixa normal tiveram produtividade significativamente menor, considerando as faixas obtidas pelos dois métodos.

Para o N, em MG, a produtividade dos plantios com teores excessivos deste nutriente foi significativamente menor em comparação com os plantios com teores adequados, considerando as faixas obtidas por ambos os métodos. No PR, constatou-se tal diferença apenas ao utilizar as faixas obtidas pela ChMR.

3.3.6. Avaliação do estado nutricional das populações em estudo

Observou-se, no PR, a maior proporção (%) de talhões com teores foliares dentro das faixas normais, por ambos os métodos (Figura 10). Por sua vez, SP apresentou a maior proporção de talhões com teores foliares classificados como deficientes. Os diagnósticos obtidos pelos métodos da Chance Matemática Relativa e da Linha da Fronteira mostraram-se muito semelhantes em SP e no PR. Já em MG, verificou-se grande diferença entre os métodos na classificação dos talhões quanto ao estado nutricional para P, K, Ca, Mg, Cu e Fe. De modo geral, nas três regiões verificou-se um maior percentual de talhões com teores foliares na classe deficiente com o uso das faixas de suficiência determinadas pelo método da Linha da Fronteira.

Os nutrientes que apresentaram a maior frequência de talhões com teores foliares classificados como deficientes em MG foram K (69%) e Zn (37%) pela ChMR, e K (36%), Cu (31%) e Zn (26%) pela LF. Enquanto em SP, foram Ca (51%), Mg (44%) e P (36%) pela ChMR, e Mg (46%), Ca (41%) e Zn (36%) pela LF. Já no PR, foram S (34%), N (29%) e Fe (24%) pela ChMR, e B (43%), Fe (36%) e Mn (35%) pela LF, os nutrientes com maior frequência de talhões com teores deficientes.

Tabela 17. Produtividade (IMAH) dos talhões com teores foliares classificados como deficientes (Def), adequados (Ade) e excessivos (Exc) pelos métodos da Chance Matemática Relativa (ChMR) e da Linha da Fronteira (LF) e probabilidade (p) da significância da análise de variância.

Grupo	ChMR					LF						
	MG		SP		PR	MG		SP		PR		
	Nitrogênio											
Def	6.36	ab	6.44	b	5.73	ab	6.36	ab	6.85	b	5.80	a
Ade	6.55	a	7.26	a	6.15	a	6.58	a	7.17	ab	6.05	a
Exc	5.90	b	6.95	ab	5.53	b	5.96	b	7.45	a	5.53	a
p	0.0256		0.0015		0.0365		0.0264		0.0329		0.1191	
	Fósforo											
Def	5.87	a	6.77	b	5.68	a	6.19	a	6.62	b	5.84	a
Ade	6.42	a	7.34	a	5.94	a	6.47	a	7.23	a	5.97	a
Exc	6.45	a	7.47	a	5.61	a	6.52	a	7.35	a	5.55	a
p	0.4626		0.0019		0.5219		0.3688		0.0058		0.4259	
	Potássio											
Def	6.18	b	7.02	a	5.87	a	6.25	b	7.13	a	5.76	a
Ade	6.92	a	7.26	a	5.98	a	6.33	a	7.18	a	5.96	a
Exc	6.76	ab	6.87	a	5.53	a	6.92	a	6.92	a	5.62	a
p	0.0008		0.1428		0.3783		0.0274		0.6176		0.5090	
	Cálcio											
Def	-		6.81	b	5.64	a	6.58		6.72	b	5.66	a
Ade	6.41	a	7.50	a	5.96	a	6.32	a	7.41	ab	6.03	a
Exc	6.37	a	7.24	ab	5.81	a	6.45	a	7.98	a	5.67	a
p	0.8841		<0.0001		0.4733		0.4779		<0.0001		0.203	
	Magnésio											
Def	6.30	a	6.67	b	5.66	a	6.77	a	6.72	b	5.80	a
Ade	6.60	a	7.54	a	5.90	a	6.34	a	7.50	a	5.89	a
Exc	6.23	a	7.45	a	6.16	a	6.37	a	-		6.16	a
p	0.1469		<0.0001		0.6267		0.2323		<0.0001		0.8301	
	Enxofre											
Def	-		6.84	b	5.68	a	6.46	a	6.89	a	5.62	a
Ade	6.41	a	7.22	a	6.03	a	6.38	a	7.24	a	5.94	a
Exc	6.36	a	-		5.82	a	6.36	a	7.13	a	6.15	a
p	0.8827		0.0239		0.2587		0.9536		0.1267		0.2475	
	Cobre											
Def	-		6.60	b	6.05	a	7.09	a	6.60	b	5.81	a
Ade	7.12	a	7.45	a	5.88	a	6.04	b	7.33	a	5.95	a
Exc	6.04	b	7.15	a	-		6.13	b	6.98	ab	5.71	a
p	<0.0001		0.001		0.5675		<0.0001		0.0029		0.6479	
	Ferro											
Def	-		6.86	a	5.83	a	6.74	a	6.96	a	5.60	b
Ade	6.93	a	7.15	a	5.85	a	6.41	a	7.12	a	6.01	ab
Exc	6.23	b	-		6.21	a	6.26	a	7.46	a	6.21	a
p	0.0005		0.1566		0.5274		0.348		0.2274		0.0878	
	Zinco											
Def	5.81	b	6.82	a	5.59	a	5.76	b	6.94	a	5.61	a
Ade	6.90	a	7.17	a	6.05	a	6.72	a	7.25	a	6.01	a
Exc	5.71	b	7.19	a	5.48	a	5.63	b	7.19	a	5.49	a
p	<0.0001		0.4188		0.0574		<0.0001		0.1973		0.1598	
	Manganês											
Def	8,47		7.05	a	5.72	a	-		7.16	a	5.74	a
Ade	6.65	a	7.33	a	5.93	a	6.58	a	7.20	a	5.99	a
Exc	5.67	b	7.00	a	6.01	a	5.57	b	6.87	a	6.00	a
p	<0.0001		0.1555		0.6809		<0.0001		0.4203		0.4983	
	Boro											
Def	6.49	a	7.56	a	5.94	a	6.49	a	7.58		6.09	a
Ade	6.60	a	7.19	ab	5.96	a	6.34	a	7.23	a	5.71	a
Exc	6.03	b	6.69	b	5.70	a	6.48	a	6.81	b	5.57	a
p	0.0059		0.0003		0.4723		0.8165		0.0332		0.1268	

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste LSD ($p < 0,05$). Ausência de letra indica dados insuficientes para calcular uma média representativa (< 3 talhões no grupo).

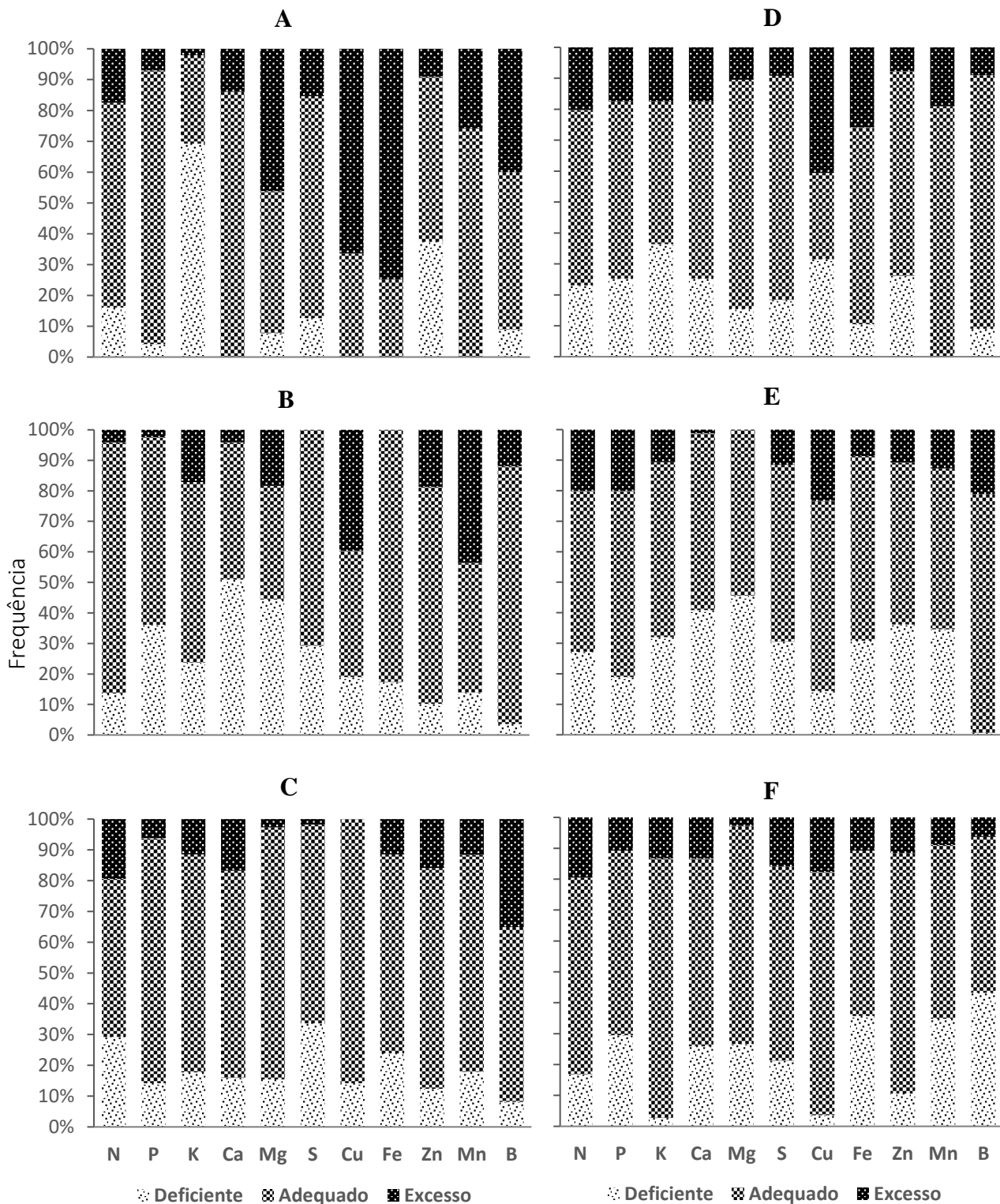


Figura 10. Frequência (%) de talhões com teores foliares classificados como deficientes, adequados e em excesso usando as faixas de suficiência obtidas para cada região pela Chance Matemática: A (MG), B (SP), C (PR), e pela Linha da Fronteira: D (MG), E (SP) e F (PR).

3.4. Discussão

3.4.1. Influência das características edafoclimáticas nos teores foliares, nas faixas de suficiência e níveis críticos

As diferenças constatadas entre as regiões, em relação aos teores foliares, evidenciam efeitos das condições edafoclimáticas sobre o estado nutricional dos plantios. Diversos autores têm descrito os efeitos do solo e do manejo (Rocha et al., 2016; de Melo et al., 2016; Silva et al., 2004; Schönau, 1988), da idade do povoamento (Silva, 2006; Wadt, 2004), do clima (Sardans et al., 2016, Sardans et al., 2012; Herbert, 1991) e do material genético (Wadt et al., 1999; Barros et al., 2000) sobre a concentração de nutrientes nas folhas de espécies florestais. Considerando que todos os povoamentos estudados neste trabalho pertencem a um único material genético, numa faixa etária relativamente estreita (12 a 24 meses), pode-se afirmar que as diferenças observadas entre as regiões, nos teores foliares, ocorreram devido, principalmente, a fatores ambientais (clima e solo) e às práticas de fertilização adotadas em cada empresa.

Assim, os menores teores foliares e os menores limites da faixa normal para nitrogênio observados em MG, podem relacionar-se a baixos teores de matéria orgânica no solo (Pulito et al., 2017; Gonçalves et al., 2001; Attiwill, 1995), associados aos baixos índices pluviométricos. Estes, além de afetar as taxas de mineralização do N da matéria orgânica (Cantarella, 2007; Vitousek e Sanford, 1986), interferem no fluxo de massas no solo, mecanismo indispensável para que ocorra o contato dos íons amônio e nitrato com a raiz e, conseqüentemente, a absorção destes pelas plantas (Malavolta et al., 1997). Por outro lado, é possível que os maiores valores da faixa normal de N observados em SP, se relacionem à maior oferta do nutriente, em virtude de condições edafoclimáticas mais favoráveis à mineralização do N da matéria orgânica, como maior umidade e maior aeração do solo (Pulito et al., 2017). Também, é esperado que sob condições climáticas que favorecem o crescimento e as taxas fotossintéticas, os níveis críticos de N nas folhas sejam maiores, devido à estreita relação da concentração foliar do N com a fotossíntese, por ser este nutriente um constituinte da clorofila e da rubisco (Grassi et al., 2002; Wemer e Adams, 2004).

Em relação ao fósforo, também em MG constataram-se menores teores foliares desse nutriente (Tabela 11), devido, muito provavelmente, à predominância de solos com baixos teores de P disponível, altos teores de argila e avançado estado de intemperismo (Novais et al., 2007). Mesmo tendo recebido fertilizações com doses de P_2O_5 semelhantes nas três regiões (Tabela 2), os teores foliares médios de P em SP e no PR foram, respectivamente, 1,5 e 2,0 vezes superiores aos observados em MG, o que evidencia o caráter-dreno-P desses solos (Novais et al., 2007). No PR, os teores foliares de P mostraram-se superiores aos das outras regiões, provavelmente relacionado ao alto teor de matéria orgânica dos solos. De fato, a matéria orgânica aumenta a disponibilidade de P para as plantas bloqueando os sítios de adsorção de P e deslocando parte do P adsorvido pela fração mineral (Silva e Mendonça, 2007).

As diferenças observadas nos teores foliares de potássio também refletem as diferenças na disponibilidade do nutriente no solo entre as regiões. Mesmo com as menores doses de K aplicadas via adubação (Tabela 2), no PR, verificaram-se os maiores teores foliares do nutriente; fato que pode ser explicado pelos maiores conteúdos de K trocável (Tabela 10) e pela maior disponibilidade de água no solo nessa região (Ernani et al., 2007; Sardans et al., 2012).

Do mesmo modo, é possível estabelecer relações entre os teores foliares dos demais nutrientes e as condições edafoclimáticas da região e o manejo nutricional dos plantios, já que que a concentração dos nutrientes nas folhas na fase juvenil das plantações, antes de se intensificar a ciclagem biogeoquímica de nutrientes (Laclau et al., 2013), é consequência, principalmente, da disponibilidade do nutriente no solo, da quantidade e da qualidade do fornecimento nas fertilizações e das condições hídricas e térmicas que influem no contato íon-raiz no solo e na absorção de nutrientes pelas plantas. Esses aspectos, certamente, irão influenciar também a determinação dos níveis críticos e ótimos dos nutrientes nas folhas (Lima Neto, 2020). Assim, por exemplo, níveis críticos baixos de um determinado nutriente podem indicar a predominância de teores foliares baixos na população de referência, devido à escassez do nutriente no solo e a doses de adubo insuficientes para atender à demanda das árvores numa fase específica de crescimento.

Observaram-se maiores semelhanças entre as faixas normais obtidas por métodos diferentes para uma mesma região, do que entre as faixas de regiões diferentes obtidas pelo mesmo método (Tabelas 13 e 15). Ainda, as faixas gerais apresentaram, em sua maioria, maior amplitude do que as regionais, o que causa menor sensibilidade no diagnóstico nutricional e aumenta a probabilidade de falsos diagnósticos ao se utilizarem as faixas gerais (Santos et al., 2013; Urano et al., 2007). Por outro lado, observou-se baixa frequência de diagnósticos concordantes, para vários nutrientes, ao comparar os diagnósticos obtidos com uso de faixas de suficiência regionais e gerais (Tabela 16). O método empregado para determinar as faixas de suficiência também mostrou ter algum grau de interferência, mesmo assim, foi encontrado maior nível de concordância dos diagnósticos comparando faixas específicas obtidas por métodos diferentes para uma mesma região. Essas evidências sugerem ser mais adequado estabelecer valores de referência para a interpretação de análises foliares com maior especificidade, levando em consideração o ambiente físico no qual se desenvolveram os povoamentos que deram origem às normas.

Interpretar análises foliares usando faixas de suficiência estabelecidas numa região com solos cuja geologia é muito diferente, também pode conduzir a falsos diagnósticos. Por exemplo, a faixa normal de Mn no PR apresentou valores muito superiores às faixas de SP e de MG (Tabelas 13 e 15), o que se pode relacionar ao menor pH dos solos (Denchen et al., 2018) e à maior disponibilidade desse elemento nos materiais de origem dos solos do PR, uma vez que minerais de Mn são comuns em rochas ígneas, como basaltos e riolitos, e em ambientes glacio-marinhos, devido a depósitos sedimentares com fonte em erupções vulcânicas submarinas (Roy, 2006). Ao contrário, em MG predominam os solos de

origem sedimentar e muito intemperizados, além de terem recebido altas doses de calcário, elevando o pH do solo temporariamente, o que explicaria os menores valores da faixa normal obtida para o Mn nessa região. Desse modo, pode-se afirmar que, em regiões onde alguns elementos são naturalmente abundantes no solo, ou têm sua disponibilidade aumentada em função do manejo da fertilização, os teores desses elementos nas folhas, considerados como ótimos, provavelmente também serão altos; o que não significa, necessariamente, que sejam o ótimo real para as plantas, mas podem estar apenas refletindo um consumo de luxo.

3.4.2. Influência do método na determinação das faixas de suficiência e níveis críticos

Verificaram-se muitas semelhanças entre as faixas normais estabelecidas pelos métodos da Chance Matemática Relativa e da Linha da Fronteira. Encontraram-se discrepâncias importantes entre métodos somente nas faixas para K, Cu e B nas três regiões, para Fe, em MG, e para Zn e Mn, em SP (Tabelas 13 e 15). As faixas de suficiência obtidas pelo método da ChMR mostraram-se mais efetivas em distinguir os grupos de povoamentos com diferentes estados nutricionais (deficiente, adequado e excessivo) quanto à sua produtividade média (IMAH) (Tabela 17). De acordo com Wadt et al. (2013), uma vez definidas as faixas de suficiência, espera-se que plantios com teores adequados apresentem produtividade superior àqueles com deficiências nutricionais. Portanto a verificação de diferenças na produtividade entre grupos de estado nutricional pode auxiliar na validação dos limites das faixas normais e na ponderação da eficácia dos métodos empregados para determiná-las.

Analisando, pontualmente, as faixas de suficiência que apresentaram menos concordância entre os métodos, observa-se que as faixas normais para Cu, em MG e no PR, foram menores quando determinadas pela ChMR. Enquanto, em SP, a faixa normal obtida pela ChMR, esteve contida na faixa determinada pela LF (Tabelas 13 e 15). Em MG, o crescimento em altura dos plantios com teores adequados, classificados pela LF, foi significativamente menor do que o dos plantios com teores supostamente deficientes. Por outro lado, usando as faixas obtida pela ChMR, não houve nenhum talhão classificado como deficiente (Tabela 17). Isso sugere que o nível crítico real de Cu nas folhas nessa região seja inferior a $7,4 \text{ g kg}^{-1}$ e superior a $3,1 \text{ g kg}^{-1}$, limites inferiores das faixas normais obtidas por ambos os métodos. Em SP, observaram-se diferenças significativas entre os grupos com teores de Cu adequado e deficiente pelos dois métodos. Nesse tipo de situação, do ponto de vista prático, e considerando o uso sustentável de fertilizantes, é mais conveniente empregar o menor nível crítico, que, no caso do Cu, foi obtido pela LF ($5,6 \text{ g kg}^{-1}$).

Para o K, os limites das faixas de suficiência pela LF foram menores em MG e maiores em SP, em comparação com as faixas obtidas pela ChMR (Tabelas 13 e 15). Em MG, as faixas indicadas pelos dois métodos permitiram observar diferenças na produtividade dos grupos deficiente e adequado. Contudo, a produtividade média do grupo com teores adequados pela ChMR ($6,92 \text{ m ano}^{-1}$) foi maior

do que a do grupo adequado pela LF ($6,33 \text{ m ano}^{-1}$) (Tabela 17). Por outro lado, a faixa normal de K obtida pela ChMR ($7,9$ a $10,6 \text{ g kg}^{-1}$), em MG, possui valores semelhantes aos observados por Silva (2006) ($7,0$ a $10,8 \text{ g kg}^{-1}$) em condições similares de sítio. Por sua vez, em SP, mesmo não havendo diferenças significativas de produtividade entre os grupos de estado nutricional, independentemente do método, observou-se maior produtividade média ($7,26 \text{ m ano}^{-1}$) no grupo adequado pela ChMR. Também, a faixa normal de K obtida pela ChMR ($7,9$ a $10,8 \text{ g kg}^{-1}$), em SP, é próxima da faixa estabelecida por Fernandes (2010) ($7,9$ a $12,4 \text{ g kg}^{-1}$). Esses fatos permitem dizer que, em MG e SP, as faixas normais de K obtidas pela ChMR parecem mais adequadas e que a sua utilização conduziria a diagnósticos nutricionais mais precisos.

As faixas normais de B, nas três regiões, apresentaram maior amplitude e maiores limites superiores quando determinadas pela LF, do que pela ChMR (Tabelas 13 e 15). Em MG, quando classificado pela ChMR, o grupo de talhões com teores excessivos teve menor IMAH que o grupo com teores adequados; não ocorrendo tais diferenças quando utilizadas as faixas obtidas pela LF (Tabela 17). Isso sugere que o limite superior da faixa normal estaria próximo ao valor obtido pela ChMR (56 g kg^{-1}). Por sua vez, em SP, a mesma diferença entre grupos adequado e excessivo foi observada somente quando classificados os talhões pela LF, indicando que, nessa região, seja mais apropriado aceitar como limite superior da faixa normal um valor próximo a 57 g kg^{-1} .

Fernandez (2010) e Silva (2006) obtiveram faixas de suficiência específicas na região centro-oeste de São Paulo e no Vale do Rio Doce em Minas Gerais, em condições edafoclimáticas e idades comparáveis às consideradas neste estudo. Embora tais autores tenham estudado povoamentos de distintos materiais genéticos e empregado metodologias diferentes (DRIS e IBKW), alguns resultados mostraram-se muito próximos aos obtidos neste estudo. De modo geral, as faixas de suficiência determinadas por Fernandes (2010) apresentaram mais semelhanças com as obtidas neste trabalho pelo método da ChMR. As diferenças mais relevantes foram observadas em relação ao limite superior da faixa normal de Mn (1021 g kg^{-1}), sendo 2,7 e 1,6 vezes maior do que o limite superior da faixa obtida pela ChMR e pela LF, respectivamente. Além disso, o limite inferior da faixa de Fe definido pela autora (24 g kg^{-1}), foi um terço da média dos limites observados neste trabalho por ambos os métodos. As faixas normais obtidas por Silva (2006) em Minas Gerais para N, P, K, Mg, Zn, foram semelhantes às observadas neste trabalho pela ChMR. Entretanto os níveis críticos observados pelo autor para Mn, Fe e B foram, respectivamente, 5, 3 e 2 vezes maiores do que a média dos níveis críticos obtidos pela ChMR e pela LF.

Não se encontraram referências na literatura de faixas de suficiência de eucalipto específicas para o Paraná. Todavia, ao comparar as faixas normais obtidas neste trabalho e as propostas por Gonçalves (2011) para as espécies de eucalipto mais plantadas no Brasil, observaram-se grandes diferenças. Os limites inferior e superior das faixas normais determinadas para P, K, Ca, Mg, S, Zn e Mn são maiores, enquanto os limites de Cu e B são menores, em comparação às faixas definidas pelo

autor. Os níveis críticos de N e Fe assemelham-se, porém, as faixas obtidas pela ChMR e pela LF para o PR são mais estreitas. Da mesma forma, as faixas normais obtidas para MG e SP, divergiram significativamente das faixas gerais observadas na literatura para a cultura do eucalipto no Brasil (Galdino, 2015; Gonçalves, 2011; Malavolta et al., 1997).

Ambas as metodologias empregadas apresentaram resultados promissores para o desenvolvimento dos valores de referência para interpretação de análises foliares nas áreas de estudo. No entanto, a ChMR parece ter proporcionado, de modo geral, resultados mais acertados a partir do conjunto de dados analisado. Espera-se que com a adição de um maior número de dados possam ser gerados valores de referência ainda mais precisos. Por exemplo, pela LF, ao incrementar o número de observações aumenta a probabilidade de obter valores de produtividade representando cada classe de teor foliar, melhorando assim a curvatura da linha da fronteira, e obtendo regressões com maior coeficiente de determinação e nível de significância.

Também, é importante levar em consideração algumas particularidades dos métodos. No método da Chance Matemática Relativa há certa subjetividade na escolha do valor (%) de ChMR a partir do qual será considerado o intervalo de teores foliares que definem as faixas de suficiência. Wadt et al. (2013) testaram os valores mínimos de 40 e 50% de ChMR_i na definição de faixas de suficiência na cultura do arroz, observando maiores amplitudes nas faixas normais quando utilizado o menor valor. No desenvolvimento deste trabalho, foram testados os valores de 50% (dados não apresentados) e 60% como limite de ChMR, verificando faixas muito amplas quando empregado o limite de 50%. Almeida et al. (2016) sugerem utilizar as classes de teores foliares com valores de ChMR acima de 60%. No método da Linha da Fronteira, há possibilidade de escolher o valor da produtividade relativa que irá definir os limites das faixas de suficiência. Souza et al. (2020), obtiveram faixas de suficiência para a cultura da soja a partir de 95 e de 99% da produtividade máxima estimada, observando faixas muito estreitas e maior frequência de lavouras classificadas como deficientes com as faixas obtidas para 99% da produtividade máxima. Por sua vez, Blanco-Macias et al. (2010) e Blanco-Macias et al. (2009) obtiveram resultados satisfatórios a partir de 95% da produtividade máxima. Hernandez-Vidal et al. (2020), Ali (2018) e Bhat e Sujatha (2013), conseguiram estabelecer, de forma satisfatória, faixas de suficiência a partir de 90% da produtividade máxima. No desenvolvimento deste trabalho, geraram-se faixas normais para 90 (dados não apresentados) e 95% da produtividade máxima, verificando-se, para o primeiro valor, faixas de suficiência muito amplas e, inclusive, níveis críticos negativos, os quais carecem de significado biológico.

3.4.3. Avaliação do estado nutricional dos plantios

Houve concordância entre os métodos em apontar uma alta frequência de talhões com teores foliares de K (53%) e Zn (32%) abaixo da faixa normal em MG (Figura 10), sugerindo que, para esses

nutrientes, os teores podem não estar em níveis adequados para o desenvolvimento dos plantios. Isso foi corroborado pelas diferenças em produtividade observadas entre os plantios com teores adequados e deficientes desses nutrientes. Portanto é possível afirmar que, nessa região, existe a oportunidade de realizar ajustes às estratégias de fertilização com K e Zn.

Em SP, obteve-se uma frequência média de talhões na classe deficiente de 46% para Ca e 45% para Mg (Figura 10). Ainda, a produtividade dos plantios na classe deficiente foi menor que a daqueles com teores foliares adequados (Tabela 17). Pela ChMR, verificou-se um alto número de talhões com prováveis deficiências de P (36%), S (29%) e N (14%), com produtividade média inferior à dos talhões com teores adequados. Assim, é possível que nesses povoamentos tenham ocorrido limitações de ordem nutricional, sinalizando que poderiam ser consideradas revisões nas estratégias de fertilização com tais nutrientes.

No PR, observaram-se maiores frequências de talhões com teores de N (29%) e S (34%) abaixo da faixa adequada, pela ChMR, e de Fe (36%), Mn (35%) e B (43%), pela LF (Figura 10). Contudo, não se comprovaram diferenças significativas em produtividade entre os grupos de talhões com teores classificados como adequados e deficientes (Tabela 17), o que permite inferir que, não necessariamente, ocorreu uma limitação do crescimento em altura devido a deficiências desses nutrientes. Todavia a probabilidade de respostas futuras a adubações complementares com N, S e B, nessa região, deve ser baixa, em função da predominância de solos com altos teores de matéria orgânica, principal fonte desses nutrientes para as plantas (Attiwill, 1995; Abreu et al., 2007; Silva e Mendonça, 2007).

Em SP, de modo geral, ocorreram maiores diferenças na produtividade entre os plantios com teores foliares adequados e deficientes, do que entre plantios com teores adequados e acima do adequado. Isso sugere que a produtividade pode ter sido mais limitada pela falta do que pelo excesso dos nutrientes. O mesmo foi verificado em MG para K e Zn. No PR, praticamente não se observaram diferenças na produtividade entre os grupos de povoamentos com teores deficientes, adequados e em excesso. Ainda nessa região, o crescimento médio em altura foi menor do que nas demais regiões, o que deve estar relacionado a um efeito do clima e não a causas nutricionais. Binkley et al. (2020) relataram menores taxas de crescimento inicial do eucalipto em ambientes subtropicais em comparação aos tropicais, associados a temperaturas mais baixas.

Não se verificaram, em nenhuma região, diferenças na produtividade entre os povoamentos com teores de B adequados e deficientes, o que pode estar refletindo um efeito de diluição desse elemento, de ocorrência muito provável, por ser este um nutriente com mobilidade reduzida no floema. Ao contrário, para o N, em MG e PR, a maior produtividade dos povoamentos com teores dentro da faixa normal em comparação àqueles com teores acima dessa faixa, pode ser um indicador do efeito de concentração do elemento nas árvores que cresceram menos, por causa de outros fatores limitantes.

3.5. Conclusões

As faixas normais e níveis críticos dos nutrientes nas folhas foram influenciadas pelas condições edafoclimáticas, indicando que, para a interpretação de análises foliares de plantios jovens de eucalipto, seja mais adequado o uso de valores de referência obtidos regionalmente.

Por meio da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, foi possível estabelecer faixas de suficiência para três regiões nos estados de São Paulo, de Minas Gerais e do Paraná. Os resultados são promissores para interpretar análises foliares de plantações jovens do clone AEC144 em ambientes semelhantes.

Os dois métodos apresentaram concordância em determinar maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná.

Verificou-se uma alta frequência (>25%) de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, Ca, Mg, e S em São Paulo, com aparente possibilidade de resposta a adubações complementares. Já no Paraná, observaram-se as menores frequências de talhões com teores abaixo dos níveis críticos estabelecidos.

Referências

- ALI, A.M. Nutrient sufficiency ranges in Mango using Boundary-Line approach and Compositional Nutrient Diagnosis Norms in El-Salhiya, Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 49:2, 186-201, 2018.
- ALMEIDA, E.I.B., DE DEUS, J.A.L., CORRÊA, M.C.M., CRISOSTOMO, L.A., NEVES, J.C.L. Linha de fronteira e chance matemática na determinação do estado nutricional de pitaia. **Revista Ciência Agronômica**, 47:4, 744-754, 2016.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013.
- ATTIWILL, P.M. Nutrient cycling in forests. In: NIERENBERG, W.A. **Encyclopedia of environmental biology**. San Diego, Academic Press, v.2, p.425-439, 1995.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000, p.270-283.

- BASSIRIRAD, H. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change. **New Phytologist**, 147, 155-169, 2000.
- BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000, p.106-133.
- BHAT, R., SUJATHA, S. Establishing leaf nutrient norms for arecanut by boundary line approach. **Journal of Plant Nutrition**, 36:6, 849-862, 2013.
- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A., MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 173, 972-934, 2010.
- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A. Comparison between CND norms and Boundary-Line approach nutrient standards: *Opuntia ficus-indica* L. case. **Revista Chapingo Serie Horticultura**, 15:2, 217-223, 2009.
- CAMACHO, M.A.; VARGAS D.S.M.; CAMARGO, R.A.; NATALE, W. Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranjeira-pera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 193-200, 2012.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, p. 375-470, 2007.
- CPRM. Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folhas Paranapanema (SF.22) e Curitiba (SG.22). Escala 1:1.000.000. Serviço Geológico do Brasil, 2004.
- CPRM. Mapa geológico do estado de São Paulo. Escala 1:750.000. Serviço Geológico do Brasil, 2006.

- CPRM. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Serviço Geológico do Brasil, 2012.
- GOVERNO DO PARANÁ. Carta geológica da folha de Telêmaco Borba. Escala 1:250.000. 2005.
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R.; CARMELLO, Q.A.C.; SANTOS, L.A.; SPERANDIO, M.V.L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S.R.; SANTOS, L.A. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, p. 491-562, 2018.
- De ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; GABRIELLI, G. C. Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 645-736, 2007.
- De MELO, E.A.S.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; WENZEL, A.V.Q.; JUNIOR, J.C.A.; BORGES, J.S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C.C.Z.; FERREIRA, E.V.O.; FERRAZ, A.V. Response of clonal eucalypt plantations to N, P and k fertilizer application in diferente edaphoclimatic conditions. **Forests**, 7, 0002, p.1-15, 2016.
- EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Escala 1:600.000, 2007.
- ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANDOS, F.C. Potássio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 551-594, 2007.
- FERNANDES, L.V. **Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto**. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010. 84 p.
- FICK, S. E., HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, 37(12), 4302–4315, 2017.
- GALDINO, M. P. **Valores de referência e faixas de suficiência para avaliação do estado nutricional da cultura do eucalipto no brasil**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015. 123 p.

- GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.F.C.S.; SASAKI, C. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.25, n.3, p.601-616, 2001.
- GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: **Anais do II Encontro Brasileiro de Silvicultura**; Campinas. Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF; 2011. p. 85-113.
- HERBERT, M. A. The Influence of Site Factors on the Foliar Nutrient Content of *Eucalyptus grandis* in Natal. *South African Forestry Journal*, v. 156, n. 1, p. 28–34, mar. 1991.
- HERNÁNDEZ-VIDAL, E.; BLANCO-MACÍAS, F.; GONZÁLEZ-TORRES, A.; VÉLIZ-DERAS, F.G.; GAYTÁN-ALEMÁN, L.; VALDEZ-CEPEDA, R.D. Boundary-Line Approach Macro-Nutrient Standards for *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller Variety “Rojo Pelón” Fruiting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2020.
- LIMA NETO A.J., NEVES JCL, MARTINEZ HEP, SOUSA JS, FERNANDES LV. Establishment of critical nutrient levels in soil and plant for eucalyptus. **Rev Bras Cienc Solo**. 2020; 44:e0190150.
- LOURENÇO, H.M. Diagnose nutricional de eucalipto e impacto da disponibilidade de água e nutrientes nos estoques de carbono do povoamento. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012, 113 p.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed., Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319 p.
- MATOS, G.S.B.; FERNANDES, A.R.; WADT, P.G.S.; FRANZINI, V.I.; SOUZA, E.M.C.; RAMOS, H.M.N. Dris calculation methods for evaluating the nutritional status of oil palm in the Eastern Amazon. **Journal of Plant Nutrition**, v 41, n.10, p.1240-1251, 2018.
- NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LEITE, R.A.; ALVAREZ, V, V.H.; SILVA, I.R. Monitoramento nutricional e recomendação de adubação. In: **Encontro Brasileiro de Silvicultura**, 2008, Curitiba. Encontro brasileiro de Silvicultura, v.1, p51-60, 2008.

- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 471-550, 2007.
- PAIM E.V., CUNHA, F.G. Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018. 238 p.; 30 cm.
- PULITO, A.P.; GONÇALVES, J.H.T.; SMETHURST, P.; ARTHUR JUNIOR J.; ALVARES, C.A.; ROCHA, J.H.T.; HÜBNER, A.; MORAES, L.F.; MIRANDA, A.; KAMOGAWA, M.; GAVA, J.L.; CHAVES, R.; SILVA, C. Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in Brazilian eucalypt plantations on soils of contrasting texture. **Forests**. 2015; 6:973-91.
- ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. M.; GAVA, J. L.; GODINHO, T. O.; MELO, E. A. S. C.; BAZANI, J. H.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1-10, 2016.
- ROY, S. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system. **Earth-Science Reviews**, 77(4):273-305, 2006.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *E. grandis* e *E. saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore*, 26(4): 447- 457, 2002.
- SANTOS, E.F.; DONHA, R.M.A; ARAÚJO, C.M.M; JUNIOR, J.L.; CAMACHO, M.A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos de ChM, DRIS e CDN e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1651-1658, 2013.
- SARDANS, J., ALONSO, R., CARNICER, J., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M., VIVANCO, M.G., PEÑUELAS, J. Factors influencing the foliar elemental composition and stoichiometry in forest trees in Spain. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, 18, 52–69, 2016.

- SARDANS, J., PEÑUELAS, J., COLL, M., VAYREDA, J., RIVAS-UBACH, A. Stoichiometry of potassium is largely determined by water availability and growth in Catalanian forests. **Functional Ecology**, p 1-13, 2012.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.2 User's guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2016.
- SILVA, G.D.C.; NEVES, J.C.L.; ALVARES, V.H.; LEITE, F.P. Nutritional Diagnoses for eucalypt by DRIS, M-DRIS and CND. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p.507-515, 2004.
- SILVA, G.G.C. Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Viçosa: UFV, 102p., 2006;
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67-78, 2013.
- SILVA, I.R.; MENDONÇA, E. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 645-736, 2007.
- SILVA, M.K.A.; ROSA, R. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais/Brasil. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4393-4400.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do Eucalyptus: Diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000. p.79-104.
- SCHÖNAU, A.P.G.; HERBERT, M.A. Relationship between Growth Rate and Foliar Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for Eucalyptus grandis. **South African Forestry Journal**, v. 120, n. 1, p. 19–23, 1982.

- SOUZA, H.A.; VIEIRA, P.F.M.; ROZANE, D.E.; SAGRILO, E.; LEITE, L.F.C.; FERREIRA, A.C.M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2020, 44:e0190125, p. 1-14.
- URANO, E.O.M.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C.; MARCHETTI, M.E. Determinação de teores ótimos de nutrientes em soja pelos métodos Chance Matemática, Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação e Diagnose da Composição Nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 63-72, 2007.
- VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Nutrient cycling in most tropical forests. **Ann. Ver. Ecol. Syst.**, 17:137-167, 1986.
- WALWORTH, J.L.; LETZSCH, W.S.; SUMNER, M.E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. **Soil Sci Soc Am J.** 1986; v.50, p.123-128.
- WADT, P.G.S. **Os métodos da Chance Matemática e do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1996. 123 p.
- WADT, P.G.S. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; FONSECA, S.; BARROS, N.F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 685-692, 1998.
- WADT, P.G.S.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.B.; DIAS, L.E. Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.34, n.10, p.1797-1803, out. 1999.
- WADT, P.G.S.; Nutritional status of Eucalyptus grandis clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Árvore**, v.28, p.15-20, 2004

WADT, P.G.S.; ANGHINONI, I.; GUINDANI, R.H.P.; DE LIMA, A.S.T.; PUGA, A.P.; DA SILVA, G.S.; PRADO, R.M. Padrões nutricionais para lavouras arrozeiras irrigadas por inundação pelos métodos da CND e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 145-156, 2013.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E APLICAÇÕES

4.1. Efeitos das condições ambientais

O conhecimento das interações abióticas dos genótipos com os sítios traz informação relevante para a correta alocação dos materiais genéticos, para avaliar o impacto da variabilidade climática e dos atributos do solo na produtividade, nas propriedades da madeira e no manejo nutricional, para ajustar e aprimorar modelos de predição, e contribuir na definição de ambientes de produção e unidades de manejo florestal. Embora este estudo tenha sido conduzido em áreas comerciais, onde se pressupõe um efeito importante do manejo sobre o desenvolvimento dos plantios, os resultados foram consoantes com os obtidos em diversos trabalhos realizados em áreas experimentais nas mesmas condições edafoclimáticas (IPEF, 2019). Isso confirma que, numa escala geográfica ampla, as limitações ambientais se sobrepõem a pequenas diferenças no manejo das florestas, o que é interessante para definir o grau de intervenção por meio de práticas silviculturais e para a otimização do uso dos recursos, visando uma produção florestal sustentável.

No setor florestal brasileiro é amplamente conhecida a alta plasticidade fenotípica do clone AEC144, que lhe confere a capacidade de sobreviver e se adaptar bem a diferentes condições climáticas (Binkley et al., 2017; Araújo et al., 2019). Mesmo assim, neste estudo foi observada uma variação de cinco vezes na produtividade em volume de madeira, sendo explicada em 71% pela precipitação pluvial. Esse fato, além de reforçar a importância da disponibilidade hídrica na produção do eucalipto, sinaliza a possibilidade de uso de modelos empíricos para prever o potencial produtivo das regiões em função da precipitação. O uso destes modelos mais simples é especialmente útil em locais que dispõem de poucas informações prévias, como é o caso das novas áreas de fronteira e áreas de expansão dos empreendimentos florestais. Ainda, o desenvolvimento de modelos a partir de variáveis que reflitam os padrões de distribuição das chuvas e do déficit hídrico (i.e.: MDEF10) e a capacidade de armazenamento de água dos solos (i.e.: teor de argila e CAD), poderão gerar boas estimativas da produtividade ao nível regional.

A temperatura média do ar, além de apresentar relação negativa com a produtividade e com os teores de nutrientes nas folhas, apresentou ter alto poder discriminatório, pela análise discriminante canônica, indicando ser útil na separação e classificação de grandes ambientes de produção. As funções canônicas obtidas poderão auxiliar na classificação de novas parcelas. Além dos três mega ambientes identificados pela análise discriminante, parece ser adequada uma subdivisão das áreas estudadas em MG, devido às diferenças importantes observadas na produtividade entre as áreas com precipitação acima e abaixo de 1000 mm ano⁻¹.

4.2. Diagnose nutricional de povoamentos florestais

A importância de um correto diagnóstico nutricional reside na necessidade de utilizar os resultados das análises foliares para decidir realizar — ou não — adubações complementares, de modo a corrigir as deficiências nutricionais e diminuir, assim, as chances de perda da produtividade. Contudo, a interpretação das análises foliares por si só não garante uma recomendação de adubação eficaz. Essa decisão deve fundamentar-se numa análise mais ampla, que envolva a verificação de outras variáveis, como possíveis sintomas visuais de deficiências nutricionais ou variações nos índices de área foliar, atributos da fertilidade do solo que possam indicar baixa disponibilidade dos nutrientes aparentemente deficientes nas plantas, o crescimento das árvores relativo ao material genético, época de plantio e tipo de clima regional (i.e.: tropical, subtropical) e a aderência das adubações anteriores às recomendações técnicas. Uma análise integrada desses aspectos permitiria avaliar melhor a probabilidade de ocorrer, de fato, uma deficiência nutricional, e compreender se a mesma pode vir a limitar a produtividade. Por outro lado, a constatação das frequências com que ocorrem desvios nutricionais (deficiências ou excessos) facilita a implementação de ajustes nos programas de fertilização dos empreendimentos florestais, ao mesmo tempo que permite definir projetos de pesquisa direcionados à avaliação da resposta das árvores às adubações corretivas com aqueles nutrientes classificados como mais limitantes em cada região, permitindo ainda a validação dos valores de referência usados na diagnose nutricional.

As metodologias empregadas neste estudo, assim como outras amplamente utilizadas na diagnose nutricional das mais diversas culturas, como DRIS (Beaufils, 1973), IBKW (Kenworthy, 1961), CND (Parent e Dafir, 1992), etc., possuem tanto vantagens quanto limitações, e podem prover resultados divergentes. Não existe, atualmente, um consenso na literatura sobre qual método de diagnose nutricional é o mais adequado. Alguns autores coincidem em concluir que os métodos são complementares, e não excludentes, e em recomendar o uso simultâneo de vários deles para a interpretação de um mesmo conjunto de análises foliares (Almeida et al., 2016; Blanco-Macias et al., 2010). Os novos cenários de mudanças climáticas podem sugerir alterações nos níveis críticos dos nutrientes nas folhas. Do mesmo modo, a introdução de novos materiais genéticos e as mudanças nos patamares de produtividade, demandam uma atualização constante dos valores de referência para a diagnose nutricional do eucalipto, possível de ser realizado pelos métodos aqui testados.

Referências

ALMEIDA, E.I.B., DE DEUS, J.A.L., CORRÊA, M.C.M., CRISOSTOMO, L.A., NEVES, J.C.L. Linha de fronteira e chance matemática na determinação do estado nutricional de pitaia. **Revista Ciência Agronômica**, 47:4, 744-754, 2016.

- ARAUJO, M.J., PAULA, R.C., CAMPOE, O.C., CARNEIRO, R.L. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 454, 117631, 2019.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; STAPE, J.L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS Project. **Forest Ecology and Management** 462 (2020) 117953
- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A., MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 173, 972-934, 2010.
- BEAUFILS, E.R. **Diagnosis and Recommendation Integrated Systems (DRIS)**. Pietermaritzburg, University of Natal, 1973. 132p.
- IPEF. **Programa Cooperativo TECHS-IPEF, Relatório Final – 2012-2018**. Piracicaba, IPEF, 2019.
- KENWORTHY, A. L. Interpreting the balance of nutrient-elements in leaves of fruit trees. In: REUTHER, W. Plant analysis and fertilizers problems. Washington: American Institute of Biological Science, p. 28-43, 1961.
- PARENT, L.E.; DAFIR, M.A. Theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p 239-242, 1992.

Apêndice

Tabela A1. Variáveis climáticas por parcela no período de crescimento dos plantios.

Sítio	Tmed	PP	ETP	ETR	EXC	DEF	DEFacum	MDEF10	I. Aridez
	°C	mm ano ¹					mm	meses	
MG1	24,0	1100	1312	982	69	329	1867	39	0,84
MG2	24,2	1113	1339	1001	68	337	1940	40	0,83
MG3	24,3	894	1350	863	33	487	3127	56	0,66
MG4	24,8	912	1413	854	77	559	3217	52	0,65
MG5	23,5	756	1219	725	20	494	3254	60	0,62
MG6	23,7	768	1252	740	29	512	3326	60	0,61
MG7	24,3	847	1343	793	69	549	3157	53	0,63
MG8	23,7	780	1251	751	32	500	3211	58	0,62
MG9	24,3	1114	1315	974	227	341	2390	52	0,85
MG10	24,3	1131	1318	979	234	339	2318	51	0,86
MG11	24,5	1130	1346	988	238	358	2444	51	0,84
MG12	24,4	1113	1337	980	215	357	2498	52	0,83
MG13	24,6	920	1385	899	30	486	3201	57	0,66
MG14	24,9	962	1426	947	23	479	3196	56	0,67
Média	24,2	967	1329	891	98	438	2796	53	0,73
SP1	20,2	1582	937	917	668	20	120	3	1,69
SP2	20,0	1601	917	897	714	20	119	4	1,75
SP3	21,6	1394	1025	965	463	61	355	15	1,36
SP4	21,6	1394	1025	964	460	62	360	15	1,36
SP5	21,5	1378	1007	948	460	58	356	15	1,37
SP6	21,6	1344	1016	965	405	51	321	15	1,32
SP7	21,6	1353	1021	969	427	52	320	17	1,33
SP8	21,7	1415	1031	992	457	39	212	12	1,37
SP9	21,7	1420	1031	993	465	38	207	13	1,38
SP10	20,5	1474	962	941	548	20	125	9	1,53
SP11	21,1	1565	1028	1004	565	24	126	4	1,52
SP12	20,9	1542	990	965	597	25	158	11	1,56
SP13	21,1	1586	1011	987	616	24	133	7	1,57
SP14	21,1	1602	1013	988	633	24	135	8	1,58
Média	21,2	1475	1001	964	534	37	218	11	1,48
PR1	18,6	1530	854	838	702	17	106	6	1,79
PR2	18,8	1546	870	855	717	15	81	8	1,78
PR3	18,9	1621	887	876	752	11	77	3	1,83
PR4	19,1	1559	907	891	679	16	113	7	1,72
PR5	18,9	1545	885	864	681	20	136	5	1,75
PR6	18,3	1496	834	825	676	9	52	1	1,79
PR7	18,2	1528	827	819	722	8	56	4	1,85
PR8	18,7	1571	864	853	726	11	76	3	1,82
PR9	18,8	1537	881	870	682	11	77	6	1,74
PR10	18,6	1520	857	847	679	10	71	2	1,77
PR11	19,2	1500	918	904	622	14	95	10	1,63
PR12	19,0	1658	899	890	772	9	51	1	1,84
PR13	18,9	1479	884	871	626	13	87	7	1,67
PR14	19,2	1464	917	903	580	14	85	7	1,60
Média	18,8	1540	877	865	687	13	83	5	1,76

Tabela A2. Atributos do solo ao final da rotação na camada de 0 a 20 dm de profundidade.

Sítio	Argila	Silte	Areia	CAD	pH	MO	P resina	Al	Ca	Mg	K	CTCe
	g kg ⁻¹			mm		g dm ⁻³	mg dm ⁻³					
MG1	815	126	59	434	3,9	36,9	5,5	12,8	1,9	1,3	0,6	16,5
MG2	788	155	57	411	4,0	39,2	5,4	14,1	0,9	0,4	0,7	16,0
MG3	794	138	68	415	4,0	31,8	6,1	15,0	1,0	2,2	1,9	20,1
MG4	695	215	91	340	4,0	40,1	6,3	15,3	4,1	2,0	1,2	22,5
MG5	821	97	82	439	3,9	58,1	6,4	15,0	1,9	1,1	0,8	18,8
MG6	587	223	190	273	3,9	39,2	6,6	12,5	1,4	1,3	0,8	16,0
MG7	571	289	141	264	4,2	51,4	8,4	11,7	6,0	5,1	1,4	24,2
MG8	618	235	148	290	3,9	45,3	7,0	15,7	0,3	0,9	0,5	17,4
MG9	113	29	858	104	3,8	19,9	5,5	5,7	1,1	0,4	0,6	7,8
MG10	125	22	853	107	4,3	23,4	5,8	12,5	5,0	5,1	0,5	23,1
MG11	195	24	782	92	3,8	27,3	6,4	8,6	1,1	0,9	0,7	11,3
MG12	138	53	809	110	3,9	23,8	7,2	7,5	2,3	1,8	0,7	12,3
MG13	589	91	319	274	4,1	40,4	7,5	6,6	3,0	1,4	0,9	11,9
MG14	804	139	57	424	3,9	33,7	8,7	16,2	2,7	1,1	0,7	20,8
Média	547	131	322	284	4,0	36,5	6,6	12,1	2,3	1,8	0,9	17,1
SP1	361	130	509	172	4,4	30,2	3,6	3,3	49,7	35,8	1,5	90,4
SP2	167	50	784	116	3,9	29,5	4,0	11,1	1,8	2,0	0,7	15,6
SP3	63	17	920	94	4,3	17,3	3,7	2,7	4,6	2,2	0,4	9,9
SP4	115	16	909	105	5,2	18,6	4,8	0,9	13,2	6,5	1,4	22,0
SP5	88	15	897	99	3,9	18,9	4,2	9,9	1,3	0,7	1,4	13,4
SP6	100	42	858	102	3,9	20,2	4,6	6,1	2,4	1,6	1,5	11,6
SP7	38	26	937	67	4,7	31,1	8,1	0,3	9,4	2,9	1,6	14,3
SP8	126	73	800	80	4,5	31,1	9,8	3,2	30,1	7,1	2,9	43,2
SP9	76	67	857	73	4,2	28,6	6,7	6,7	8,6	2,9	2,7	20,9
SP10	139	49	812	110	4,0	27,3	4,6	8,1	4,8	6,0	0,9	19,8
SP11	420	104	476	194	4,0	38,8	4,5	11,4	2,2	1,3	0,9	15,8
SP12	152	45	804	113	4,8	25,4	4,6	5,1	12,4	10,1	0,8	28,5
SP13	75	28	897	97	3,7	19,9	4,6	8,4	1,1	0,5	0,5	10,6
SP14	100	30	870	102	3,6	25,0	5,5	9,6	1,1	0,5	0,8	12,1
Média	144	49	809	109	4,2	25,9	5,2	6,2	10,2	5,7	1,3	23,4
PR1	263	69	668	141	3,9	34,7	6,7	15,3	2,2	2,0	0,6	20,1
PR2	166	79	755	58	3,8	31,1	6,7	13,4	4,0	2,7	0,6	20,6
PR3	327	19	654	161	3,8	50,4	22,1	35,2	5,5	0,5	1,0	42,3
PR4	225	50	725	131	3,8	27,3	7,8	18,2	1,2	0,4	0,6	20,3
PR5	556	332	112	256	3,8	49,1	8,2	34,8	3,1	0,7	1,1	39,7
PR6	331	79	590	162	3,7	40,8	8,1	18,4	1,4	0,5	0,5	20,9
PR7	263	581	156	71	3,9	35,0	7,3	12,7	2,4	0,5	0,5	16,2
PR8	246	96	658	137	3,9	29,5	7,8	14,0	2,4	1,4	0,5	18,4
PR9	333	112	555	81	3,9	39,8	9,0	16,1	2,9	1,1	0,7	20,8
PR10	317	82	601	158	4,0	32,4	8,1	12,8	3,1	2,4	0,7	19,0
PR11	141	78	781	55	3,6	32,7	9,6	29,7	2,5	0,2	0,8	33,2
PR12	351	176	473	169	4,0	40,1	9,3	13,6	6,5	4,7	0,6	25,4
PR13	362	430	208	86	3,8	36,0	11,0	29,9	6,7	1,1	2,1	39,7
PR14	354	205	440	85	3,7	33,4	10,1	31,3	4,1	0,5	0,9	36,9
Média	302	171	527	125	3,8	36,6	9,4	21,1	3,4	1,3	0,8	26,7

Tabela A3. Variáveis de crescimento e de produção de madeira.

Sítio	DAP	H	Vmi	Hdom	DBM	IMAB	IMAV
	cm	m	m ³	m	g cm ⁻³	t ha ⁻¹ ano ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹
MG1	13,9	22,8	0,168	25,2	0,45	21,7	42,4
MG2	12,5	21,9	0,124	24,5	0,50	18,3	35,4
MG3	12,9	21,9	0,131	23,7	0,55	13,3	26,1
MG4	11,3	17,9	0,083	19,7	0,48	11,9	23,4
MG5	13,8	21,4	0,151	22,7	0,47	12,7	25,5
MG6	12,5	18,2	0,104	19,0	0,53	8,5	17,3
MG7	11,2	16,7	0,074	17,9	0,49	7,6	15,3
MG8	12,5	19,0	0,106	19,9	0,50	9,7	19,5
MG9	15,9	28,1	0,264	30,0	0,51	21,9	42,8
MG10	17,0	29,4	0,327	32,3	0,48	26,9	52,5
MG11	15,5	27,1	0,245	29,4	0,47	20,2	39,5
MG12	16,8	29,0	0,304	30,8	0,51	24,5	48,1
MG13	14,8	25,9	0,208	28,2	0,51	19,1	37,5
MG14	13,1	21,2	0,135	22,7	0,48	13,1	26,0
Média	13,9	22,9	0,173	24,7	0,495	16,6	32,6
SP1	15,1	24,9	0,228	29,0	0,43	30,2	69,1
SP2	14,0	23,8	0,178	28,0	0,44	22,4	51,4
SP3	14,7	24,8	0,205	28,6	0,43	27,1	61,9
SP4	14,8	25,0	0,219	29,0	0,42	28,4	64,7
SP5	14,4	23,8	0,188	27,8	0,42	24,7	56,9
SP6	14,8	22,8	0,177	25,8	0,47	21,4	49,9
SP7	14,8	23,9	0,208	28,2	0,44	26,1	60,1
SP8	13,9	21,6	0,150	24,4	0,45	20,7	48,4
SP9	14,0	21,7	0,150	23,8	0,46	19,8	46,5
SP10	15,1	24,3	0,215	28,0	0,43	27,1	62,7
SP11	16,2	26,6	0,261	28,4	0,44	33,2	76,5
SP12	15,2	24,5	0,214	28,3	0,43	26,5	60,8
SP13	12,8	21,8	0,151	27,2	0,45	22,8	52,1
SP14	14,5	25,7	0,223	30,2	0,42	26,3	59,2
Média	14,6	24,0	0,198	27,6	0,438	25,5	58,6
PR1	16,6	25,6	0,295	30,0	0,47	22,3	49,6
PR2	17,2	25,8	0,327	31,1	0,48	23,5	51,7
PR3	18,7	30,8	0,419	33,0	0,48	29,4	64,3
PR4	17,1	27,8	0,330	31,5	0,45	20,2	45,9
PR5	17,3	27,3	0,337	31,2	0,45	24,5	53,9
PR6	17,4	26,3	0,317	28,3	0,48	24,1	53,5
PR7	17,6	27,4	0,354	29,7	0,49	23,3	51,3
PR8	17,5	28,1	0,347	30,9	0,49	23,9	52,7
PR9	17,9	28,9	0,377	32,0	0,53	26,8	58,8
PR10	18,6	30,6	0,418	33,3	0,46	29,4	64,2
PR11	16,6	26,8	0,297	31,1	0,44	18,0	40,1
PR12	16,9	25,4	0,314	30,9	0,48	23,7	52,3
PR13	17,4	27,7	0,343	31,2	0,48	23,2	51,2
PR14	17,5	26,9	0,321	29,4	0,47	27,8	61,7
Média	17,4	27,5	0,343	31,0	0,473	24,3	53,7

Tabela A4. Teores de nutrientes nas folhas ao final da rotação.

Sítio	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn	Fe	Mn
	----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
MG1	16,6	1,2	3,3	6,0	2,5	1,0	39,6	4,9	10,1	282	231
MG2	18,1	1,1	3,8	4,9	2,2	1,2	37,0	4,9	9,5	307	144
MG3	16,1	1,3	4,1	4,7	2,4	1,1	39,0	5,2	8,9	150	312
MG4	17,3	1,3	3,8	5,7	2,3	1,2	41,4	5,3	10,1	121	329
MG5	13,9	1,0	4,1	5,8	2,1	0,7	32,8	4,9	7,5	313	308
MG6	13,5	0,9	3,3	5,1	2,0	0,6	28,5	4,1	6,2	210	135
MG7	12,9	0,8	4,1	5,3	2,0	0,6	33,6	4,1	6,0	103	132
MG8	13,1	0,9	3,1	4,3	1,9	0,6	26,5	3,5	5,3	157	72
MG9	17,9	1,2	4,1	4,5	2,2	0,7	51,1	4,2	6,8	141	171
MG10	17,1	1,1	4,1	4,5	2,6	0,7	46,3	4,6	7,3	106	117
MG11	16,1	1,1	3,1	4,9	2,5	0,7	41,7	5,9	7,5	155	137
MG12	17,3	1,1	3,8	3,5	2,3	0,8	43,6	4,6	7,8	102	96
MG13	17,6	1,1	4,3	5,3	2,3	0,6	38,7	4,9	7,1	147	280
MG14	17,1	1,0	3,6	4,1	2,4	0,7	22,3	4,7	8,3	139	363
Média	16,1	1,1	3,8	4,9	2,3	0,8	37,3	4,7	7,7	174	202
SP1	17,8	1,0	4,3	6,3	2,3	0,8	24,9	8,4	10,3	123	179
SP2	17,0	1,1	4,3	5,7	2,4	0,8	21,8	5,4	10,4	104	76
SP3	18,4	1,4	5,1	5,3	2,4	0,9	23,9	4,9	10,0	84	180
SP4	18,7	1,3	5,1	4,6	2,2	0,9	19,6	5,5	10,2	128	140
SP5	18,2	1,1	4,3	4,7	2,2	0,9	29,3	5,5	10,0	89	770
SP6	18,6	1,2	3,8	4,8	2,1	0,8	34,3	4,6	8,0	125	309
SP7	19,4	1,5	4,6	5,5	2,4	0,9	27,3	4,9	10,7	96	626
SP8	19,1	1,4	4,6	4,7	1,8	1,0	31,1	3,8	9,0	102	258
SP9	18,3	1,4	4,3	4,1	2,0	0,9	15,7	4,7	8,3	91	278
SP10	17,6	1,1	4,3	4,0	2,2	0,9	28,8	5,7	8,8	109	137
SP11	19,5	1,3	3,6	4,3	2,5	1,1	26,1	6,3	9,7	95	71
SP12	19,2	1,4	4,1	5,0	2,5	1,1	22,9	6,2	9,5	102	170
SP13	18,1	1,3	4,1	3,6	1,9	1,0	21,6	5,7	8,3	143	198
SP14	18,0	1,3	4,3	3,4	2,0	1,0	28,5	6,3	9,7	89	117
Média	18,4	1,3	4,4	4,7	2,2	0,9	25,4	5,5	9,5	106	251
PR1	19,6	1,4	3,3	5,8	2,5	0,7	30,4	7,1	12,3	112	396
PR2	23,4	2,2	4,1	4,5	2,6	0,8	21,4	6,1	14,1	110	195
PR3	22,6	1,6	4,3	6,9	1,7	0,7	26,9	7,2	12,6	162	209
PR4	31,9	3,2	5,4	4,4	2,9	0,8	20,6	8,5	18,7	124	271
PR5	27,5	2,3	6,9	3,6	2,3	0,7	17,9	6,9	14,0	101	291
PR6	25,3	2,1	4,3	4,0	2,8	0,8	16,3	6,8	13,3	149	263
PR7	29,2	2,3	4,6	4,4	2,7	0,9	17,6	7,3	14,7	136	314
PR8	25,9	2,1	5,4	5,0	2,5	0,9	20,8	7,7	15,3	119	321
PR9	26,5	2,1	5,9	3,9	2,4	0,9	16,5	8,6	12,8	122	282
PR10	29,9	3,0	6,6	4,6	2,4	1,2	17,3	8,1	18,4	121	216
PR11	27,0	2,0	7,9	4,0	2,2	1,1	20,8	7,2	17,5	96	350
PR12	23,1	1,9	4,3	5,6	2,2	0,8	16,1	7,1	12,2	129	95
PR13	26,6	2,2	6,6	4,9	1,7	0,8	15,2	7,2	15,4	103	389
PR14	27,2	2,3	6,4	4,2	1,7	0,8	17,2	7,6	15,2	110	286
Média	26,1	2,2	5,4	4,7	2,3	0,8	19,6	7,4	14,8	121	277

Tabela A5. Correlações entre variáveis edáficas, de produção e do estado nutricional em escala geral.

Variáveis	Argila	Silte	Areia	CAD	pH	MO	P,s	Al,s	Ca,s	Mg,s	K,s	CTCe
IMAV	-0,62	-0,29	0,60	-0,63	0,22	-0,41	0,00	-0,08	0,29	0,27	-0,02	0,24
IMAB	-0,58	-0,30	0,57	-0,59	0,19	-0,40	0,02	-0,06	0,25	0,24	-0,09	0,21
Hdom	-0,55	-0,21	0,50	-0,61	-0,11	-0,31	0,23	0,21	0,01	0,01	-0,27	0,13
DBM	0,50	0,31	-0,51	0,39	-0,29	0,35	0,23	0,18	-0,33	-0,28	-0,11	-0,21
N	-0,24	0,26	0,09	-0,41	-0,26	0,01	0,38	0,51	-0,07	-0,16	-0,12	0,19
P	-0,20	0,23	0,07	-0,35	-0,24	0,02	0,33	0,46	-0,12	-0,20	-0,12	0,11
K	-0,21	0,19	0,09	-0,35	-0,10	0,01	0,29	0,50	0,04	-0,06	0,11	0,31
Ca	0,25	-0,03	-0,18	0,27	0,25	0,30	0,21	-0,05	0,30	0,33	0,06	0,29
Mg	-0,03	-0,11	0,06	0,01	0,03	-0,17	-0,34	-0,19	-0,15	0,00	-0,46	-0,23
S	-0,02	-0,12	0,06	0,03	0,13	-0,23	-0,20	-0,08	0,07	0,03	0,16	0,01
B	0,19	-0,26	-0,05	0,33	0,01	-0,10	-0,21	-0,31	-0,10	-0,04	-0,04	-0,27
Cu	-0,16	0,14	0,07	-0,33	-0,24	0,07	0,28	0,44	0,12	0,18	-0,22	0,41
Fe	0,66	0,08	-0,55	0,71	-0,14	0,44	0,00	0,07	-0,17	-0,13	-0,23	-0,13
Mn	-0,05	0,04	0,02	-0,06	-0,02	-0,06	0,11	0,12	-0,04	-0,15	0,31	0,00
Zn	-0,17	0,19	0,06	-0,32	-0,25	0,03	0,35	0,53	-0,04	-0,10	-0,13	0,25

Tabela A6. Valores de Chance Matemática (ChM) estabelecidos para as diferentes classes de teores de nutrientes nas folhas de plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*) em MG.

Classe i	LI	LS	Ni	Ai	P (Ai/A)	P (Ai/Ni)	IMAHi	CHMi	Tmi	ChMiR
Nitrogênio										
1	12.5	13.5	5	1	0.020	0.200	7.07	0.45	13.0	18.2
2	13.5	14.6	7	2	0.041	0.286	7.63	0.82	14.1	33.2
3	14.6	15.6	11	4	0.082	0.364	7.68	1.32	15.1	53.3
4	15.6	16.7	22	7	0.143	0.318	7.54	1.61	16.1	64.8
5	16.7	17.7	15	4	0.082	0.267	7.38	1.09	17.2	43.9
6	17.7	18.8	15	5	0.102	0.333	7.31	1.35	18.2	54.4
7	18.8	19.8	16	9	0.184	0.563	7.72	2.48	19.3	100.0
8	19.8	20.8	14	8	0.163	0.571	7.65	2.34	20.3	94.2
9	20.8	21.9	13	5	0.102	0.385	7.88	1.56	21.4	63.0
10	21.9	22.9	12	3	0.061	0.250	7.83	0.97	22.4	39.1
11	22.9	24.0	8	1	0.020	0.125	7.39	0.37	23.4	15.1
12	24.0	25.0	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	24.5	0.0
Fósforo										
1	0.57	0.63	4	1	0.020	0.250	7.07	0.50	0.6	26.3
2	0.63	0.69	2	1	0.020	0.500	7.55	0.76	0.7	39.7
3	0.69	0.75	19	5	0.102	0.263	7.80	1.28	0.7	66.5
4	0.75	0.80	15	6	0.122	0.400	7.40	1.64	0.8	85.2
5	0.80	0.86	22	7	0.143	0.318	7.81	1.67	0.8	86.7
6	0.86	0.92	18	4	0.082	0.222	7.90	1.06	0.9	55.4
7	0.92	0.98	13	5	0.102	0.385	7.97	1.58	0.9	82.2
8	0.98	1.04	12	5	0.102	0.417	7.22	1.49	1.0	77.5
9	1.04	1.09	15	7	0.143	0.467	7.44	1.92	1.1	100.0
10	1.09	1.15	13	6	0.122	0.462	7.57	1.80	1.1	93.6
11	1.15	1.21	5	1	0.020	0.200	7.71	0.49	1.2	25.6
12	1.21	1.27	5	1	0.020	0.200	7.39	0.47	1.2	24.6
Potássio										
1	3.3	4.0	9	2	0.041	0.222	8.32	0.79	3.6	31.4
2	4.0	4.6	25	6	0.122	0.240	7.52	1.29	4.3	51.1
3	4.6	5.3	13	4	0.082	0.308	7.54	1.19	5.0	47.4
4	5.3	5.9	15	1	0.020	0.067	8.73	0.32	5.6	12.8
5	5.9	6.6	13	3	0.061	0.231	7.32	0.87	6.3	34.5
6	6.6	7.3	14	4	0.082	0.286	7.23	1.10	6.9	43.8
7	7.3	7.9	10	3	0.061	0.300	7.57	1.03	7.6	40.7
8	7.9	8.6	11	5	0.102	0.455	7.49	1.61	8.3	64.0
9	8.6	9.2	14	7	0.143	0.500	7.86	2.10	8.9	83.3
10	9.2	9.9	7	6	0.122	0.857	7.79	2.52	9.6	100.0
11	9.9	10.6	9	6	0.122	0.667	7.42	2.12	10.2	84.0
12	10.6	11.2	3	2	0.041	0.667	7.46	1.23	10.9	48.8
Cálcio										
1	3.2	4.0	12	6.0	0.122	0.500	7.31	1.81	3.6	91.6
2	4.0	4.9	8	5.0	0.102	0.625	7.82	1.98	4.4	100.0
3	4.9	5.7	16	7.0	0.143	0.438	7.41	1.85	5.3	93.7
4	5.7	6.5	17	6.0	0.122	0.353	7.50	1.56	6.1	78.9
5	6.5	7.4	12	4.0	0.082	0.333	7.52	1.24	6.9	62.8
6	7.4	8.2	16	3.0	0.061	0.188	7.73	0.83	7.8	41.9
7	8.2	9.0	21	6.0	0.122	0.286	7.29	1.36	8.6	69.0
8	9.0	9.8	11	4.0	0.082	0.364	7.53	1.30	9.4	65.7
9	9.8	10.7	10	4.0	0.082	0.400	8.38	1.51	10.3	76.6
10	10.7	11.5	10	3.0	0.061	0.300	8.36	1.13	11.1	57.4
11	11.5	12.3	6	1.0	0.020	0.167	7.25	0.42	11.9	21.4
12	12.3	13.2	4	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	12.8	0.0
Magnésio										
1	1.6	1.7	5	1	0.020	0.200	7.72	0.49	1.7	20.1
2	1.7	1.8	6	3	0.061	0.500	7.23	1.26	1.8	51.6
3	1.8	1.9	10	7	0.143	0.700	7.75	2.45	1.9	100.0
4	1.9	2.0	19	9	0.184	0.474	7.62	2.25	2.0	91.6
5	2.0	2.2	13	6	0.122	0.462	7.29	1.73	2.1	70.7

6	2.2	2.3	24	7	0.143	0.292	7.79	1.59	2.2	64.9
7	2.3	2.4	18	5	0.102	0.278	7.87	1.33	2.3	54.1
8	2.4	2.5	17	5	0.102	0.294	7.29	1.26	2.4	51.5
9	2.5	2.6	8	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.5	0.0
10	2.6	2.7	8	2	0.041	0.250	7.71	0.78	2.7	31.8
11	2.7	2.8	9	3	0.061	0.333	7.72	1.10	2.8	45.0
12	2.8	2.9	6	1	0.020	0.167	7.90	0.46	2.9	18.8

Enxofre

1	0.95	1.00	4	2	0.041	0.500	7.89	1.13	1.0	53.5
2	1.00	1.05	4	2	0.041	0.500	7.45	1.06	1.0	50.5
3	1.05	1.10	10	3	0.061	0.300	7.79	1.06	1.1	50.1
4	1.10	1.15	12	5	0.102	0.417	7.26	1.50	1.1	71.0
5	1.15	1.20	17	5	0.102	0.294	7.62	1.32	1.2	62.6
6	1.20	1.25	22	9	0.184	0.409	7.69	2.11	1.2	100.0
7	1.25	1.30	29	10	0.204	0.345	7.72	2.05	1.3	97.1
8	1.30	1.35	10	2	0.041	0.200	7.50	0.68	1.3	32.1
9	1.35	1.40	13	5	0.102	0.385	7.34	1.45	1.4	68.9
10	1.40	1.45	9	3	0.061	0.333	7.78	1.11	1.4	52.7
11	1.45	1.50	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	1.5	0.0
12	1.50	1.55	11	3	0.061	0.273	7.63	0.99	1.5	46.8

Cobre

1	3.1	4.6	17	14	0.286	0.824	7.56	3.67	3.9	100.0
2	4.6	6.1	19	12	0.245	0.632	7.65	3.01	5.4	82.0
3	6.1	7.6	12	7	0.143	0.583	7.82	2.26	6.9	61.6
4	7.6	9.1	1	0	0.000	0.000	0.00	0.00	8.4	0.0
5	9.1	10.6	1	1	0.020	1.000	7.07	1.01	9.9	27.5
6	10.6	12.1	6	1	0.020	0.167	7.25	0.42	11.4	11.5
7	12.1	13.6	5	1	0.020	0.200	6.98	0.45	12.9	12.2
8	13.6	15.1	12	0	0.000	0.000	0.00	0.00	14.4	0.0
9	15.1	16.6	12	2	0.041	0.167	6.89	0.57	15.9	15.5
10	16.6	18.1	22	2	0.041	0.091	8.26	0.50	17.4	13.7
11	18.1	19.6	23	3	0.061	0.130	7.84	0.70	18.9	19.1
12	19.6	21.1	13	6	0.122	0.462	7.53	1.79	20.4	48.8

Ferro

1	34.5	52.8	9	5	0.102	0.556	7.73	1.84	43.7	67.6
2	52.8	71.0	18	11	0.224	0.611	7.35	2.72	61.9	100.0
3	71.0	89.2	9	6	0.122	0.667	7.54	2.15	80.1	79.1
4	89.2	107.4	12	5	0.102	0.417	7.65	1.58	98.3	58.0
5	107.4	125.6	14	2	0.041	0.143	7.87	0.60	116.5	22.1
6	125.6	143.8	12	3	0.061	0.250	7.34	0.91	134.7	33.4
7	143.8	162.0	15	5	0.102	0.333	7.70	1.42	152.9	52.2
8	162.0	180.2	14	3	0.061	0.214	8.07	0.92	171.1	33.9
9	180.2	198.4	11	4	0.082	0.364	7.80	1.34	189.3	49.4
10	198.4	216.6	10	1	0.020	0.100	8.73	0.39	207.5	14.5
11	216.6	234.9	12	2	0.041	0.167	7.38	0.61	225.8	22.4
12	234.9	253.1	7	2	0.041	0.286	7.37	0.80	244.0	29.2

Zinco

1	2.4	4.1	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.3	0.0
2	4.1	5.9	10	1	0.021	0.100	6.98	0.32	5.0	11.0
3	5.9	7.7	17	1	0.021	0.059	7.07	0.25	6.8	8.5
4	7.7	9.5	23	4	0.083	0.174	7.44	0.90	8.6	30.9
5	9.5	11.3	25	11	0.229	0.440	7.62	2.42	10.4	83.5
6	11.3	13.0	17	11	0.229	0.647	7.47	2.88	12.1	99.2
7	13.0	14.8	26	13	0.271	0.500	7.88	2.90	13.9	100.0
8	14.8	16.6	8	5	0.104	0.625	7.39	1.89	15.7	65.1
9	16.6	18.4	3	1	0.021	0.333	7.48	0.62	17.5	21.5
10	18.4	20.1	0	0	0.000	0.000	0.00	0.00	19.2	0.0
11	20.1	21.9	1	0	0.000	0.000	0.00	0.00	21.0	0.0
12	21.9	23.7	9	1	0.021	0.111	7.02	0.34	22.8	11.7

Manganês

1	107.2	186.2	13	6.0	0.122	0.462	7.65	1.82	146.7	71.2
2	186.2	265.2	21	8.0	0.163	0.381	7.52	1.88	225.7	73.4
3	265.2	344.1	12	6.0	0.122	0.500	7.99	1.98	304.6	77.4
4	344.1	423.1	18	10.0	0.204	0.556	7.58	2.55	383.6	100.0
5	423.1	502.1	18	7.0	0.143	0.389	7.62	1.79	462.6	70.3
6	502.1	581.1	24	10.0	0.204	0.417	7.52	2.19	541.6	85.8
7	581.1	660.1	10	2.0	0.041	0.200	7.26	0.66	620.6	25.7
8	660.1	739.0	6	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	699.6	0.0
9	739.0	818.0	6	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	778.5	0.0
10	818.0	897.0	2	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	857.5	0.0
11	897.0	976.0	6	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	936.5	0.0
12	976.0	1055.0	7	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1015.5	0.0

Boro

1	18.5	26.0	12	4	0.089	0.333	7.71	1.33	22.2	51.1
2	26.0	33.5	20	8	0.178	0.400	7.81	2.08	29.7	80.1
3	33.5	41.0	18	6	0.133	0.333	7.27	1.53	37.3	59.0
4	41.0	48.5	20	10	0.222	0.500	7.80	2.60	44.8	100.0
5	48.5	56.0	11	5	0.111	0.455	7.55	1.70	52.3	65.3
6	56.0	63.6	15	5	0.111	0.333	7.24	1.39	59.8	53.6
7	63.6	71.1	10	2	0.044	0.200	7.00	0.66	67.3	25.4
8	71.1	78.6	11	0	0.000	0.000	0.00	0.00	74.8	0.0
9	78.6	86.1	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	82.4	0.0
10	86.1	93.6	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	89.9	0.0
11	93.6	101.1	5	2	0.044	0.400	7.20	0.96	97.4	37.0
12	101.1	108.7	6	3	0.067	0.500	7.92	1.45	104.9	55.7

Tabela A7. Valores de Chance Matemática (ChM) estabelecidos para as diferentes classes de teores de nutrientes nas folhas de plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*) em SP.

Classe i	LI	LS	Ni	Ai	P (Ai/A)	P (Ai/Ni)	IMAHi	CHMi	Tmi	ChMiR
Nitrogênio										
1	18.5	19.7	11	0	0.000	0.000	0.00	0.00	19.1	0.0
2	19.7	21.0	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	20.4	0.0
3	21.0	22.3	7	0	0.000	0.000	0.00	0.00	21.6	0.0
4	22.3	23.5	20	5	0.122	0.250	8.15	1.42	22.9	59.9
5	23.5	24.8	14	5	0.122	0.357	7.91	1.65	24.2	69.6
6	24.8	26.1	27	3	0.073	0.111	8.95	0.81	25.5	34.0
7	26.1	27.4	19	6	0.146	0.316	8.97	1.93	26.7	81.2
8	27.4	28.6	18	4	0.098	0.222	8.74	1.29	28.0	54.2
9	28.6	29.9	14	3	0.073	0.214	9.01	1.13	29.3	47.5
10	29.9	31.2	13	6	0.146	0.462	8.80	2.29	30.5	96.3
11	31.2	32.4	14	7	0.171	0.500	8.12	2.37	31.8	100.0
12	32.4	33.7	4	2	0.049	0.500	7.93	1.24	33.1	52.2
13	33.7	35.0	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	34.3	0.0
Fósforo										
1	0.89	0.96	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.9	0.0
2	0.96	1.03	10	1	0.024	0.100	10.01	0.49	1.0	18.5
3	1.03	1.10	13	2	0.049	0.154	8.34	0.72	1.1	27.1
4	1.10	1.17	13	0	0.000	0.000	0.00	0.00	1.1	0.0
5	1.17	1.24	22	3	0.073	0.136	8.84	0.88	1.2	33.1
6	1.24	1.31	30	11	0.268	0.367	8.50	2.67	1.3	100.0
7	1.31	1.39	15	6	0.146	0.400	8.72	2.11	1.4	79.1
8	1.39	1.46	16	5	0.122	0.313	8.34	1.63	1.4	61.1
9	1.46	1.53	13	2	0.049	0.154	8.55	0.74	1.5	27.8
10	1.53	1.60	13	1	0.024	0.077	8.16	0.35	1.6	13.3
11	1.60	1.67	10	4	0.098	0.400	8.64	1.71	1.6	64.0
12	1.67	1.74	7	4	0.098	0.571	7.97	1.88	1.7	70.6
13	1.74	1.81	4	2	0.049	0.500	8.06	1.26	1.8	47.2
Potássio										
1	6.0	6.5	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	6.2	0.0
2	6.5	7.0	10	0	0.000	0.000	0.00	0.00	6.7	0.0
3	7.0	7.4	12	2	0.049	0.167	8.50	0.77	7.2	25.6
4	7.4	7.9	16	0	0.000	0.000	0.00	0.00	7.7	0.0
5	7.9	8.4	14	7	0.171	0.500	7.97	2.33	8.2	77.8
6	8.4	8.9	15	6	0.146	0.400	8.45	2.04	8.6	68.2
7	8.9	9.4	23	6	0.146	0.261	8.93	1.74	9.1	58.2
8	9.4	9.8	16	9	0.220	0.563	8.52	3.00	9.6	100.0
9	9.8	10.3	16	2	0.049	0.125	7.97	0.62	10.1	20.8
10	10.3	10.8	16	6	0.146	0.375	8.52	2.00	10.6	66.7
11	10.8	11.3	11	2	0.049	0.182	9.25	0.87	11.0	29.1
12	11.3	11.8	11	0	0.000	0.000	0.00	0.00	11.5	0.0
13	11.8	12.3	7	1	0.024	0.143	9.17	0.54	12.0	18.1
Cálcio										
1	2.8	3.2	9	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.0	0.0
2	3.2	3.6	7	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.4	0.0
3	3.6	4.0	6	1.0	0.024	0.167	7.94	0.51	3.8	17.2
4	4.0	4.4	27	2.0	0.049	0.074	8.31	0.50	4.2	17.0
5	4.4	4.8	37	5.0	0.122	0.135	8.25	1.06	4.6	36.1
6	4.8	5.2	14	5.0	0.122	0.357	8.12	1.70	5.0	57.7
7	5.2	5.6	28	12.0	0.293	0.429	8.29	2.94	5.4	100.0
8	5.6	6.0	14	5.0	0.122	0.357	9.01	1.88	5.8	64.0
9	6.0	6.4	16	6.0	0.146	0.375	9.33	2.19	6.2	74.4
10	6.4	6.8	4	3.0	0.073	0.750	8.15	1.91	6.6	65.0
11	6.8	7.2	5	1.0	0.024	0.200	8.69	0.61	7.0	20.7
12	7.2	7.6	0	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	7.4	0.0
13	7.6	8.0	2	1.0	0.024	0.500	8.49	0.94	7.8	31.9
Magnésio										

1	2.0	2.1	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.1	0.0
2	2.1	2.3	8	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.2	0.0
3	2.3	2.4	15	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.3	0.0
4	2.4	2.6	14	2	0.049	0.143	8.63	0.72	2.5	24.5
5	2.6	2.7	14	3	0.073	0.214	8.10	1.01	2.6	34.5
6	2.7	2.8	20	3	0.073	0.150	8.52	0.89	2.8	30.3
7	2.8	3.0	16	9	0.220	0.563	8.37	2.94	2.9	100.0
8	3.0	3.1	24	9	0.220	0.375	8.29	2.38	3.0	80.8
9	3.1	3.2	23	8	0.195	0.348	8.48	2.21	3.2	75.1
10	3.2	3.4	9	2	0.049	0.222	8.58	0.89	3.3	30.4
11	3.4	3.5	15	4	0.098	0.267	9.14	1.47	3.4	50.1
12	3.5	3.7	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.6	0.0
13	3.7	3.8	4	1	0.024	0.250	9.94	0.78	3.7	26.4
Enxofre										
1	0.26	0.42	6	0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.3	0.0
2	0.42	0.58	7	0	0.000	0.000	0.00	0.00	0.5	0.0
3	0.58	0.75	13	1	0.026	0.077	7.66	0.34	0.7	13.1
4	0.75	0.91	22	3	0.079	0.136	8.07	0.84	0.8	31.8
5	0.91	1.07	18	5	0.132	0.278	9.39	1.80	1.0	68.2
6	1.07	1.23	22	9	0.237	0.409	8.46	2.63	1.2	100.0
7	1.23	1.40	22	3	0.079	0.136	8.49	0.88	1.3	33.5
8	1.40	1.56	12	3	0.079	0.250	8.20	1.15	1.5	43.7
9	1.56	1.72	12	3	0.079	0.250	8.06	1.13	1.6	43.0
10	1.72	1.88	8	3	0.079	0.375	8.66	1.49	1.8	56.5
11	1.88	2.05	8	3	0.079	0.375	8.28	1.42	2.0	54.1
12	2.05	2.21	8	2	0.053	0.250	8.29	0.95	2.1	36.1
13	2.21	2.37	6	3	0.079	0.500	7.91	1.57	2.3	59.7
Cobre										
1	4.0	5.1	18	2	0.049	0.111	8.99	0.66	4.5	23.2
2	5.1	6.2	14	4	0.098	0.286	8.70	1.45	5.7	50.9
3	6.2	7.4	22	6	0.146	0.273	8.66	1.73	6.8	60.6
4	7.4	8.5	11	7	0.171	0.636	8.67	2.86	7.9	100.0
5	8.5	9.6	20	8	0.195	0.400	8.48	2.37	9.1	83.0
6	9.6	10.8	17	6	0.146	0.353	8.31	1.89	10.2	66.1
7	10.8	11.9	16	3	0.073	0.188	8.35	0.98	11.3	34.2
8	11.9	13.0	16	2	0.049	0.125	8.28	0.65	12.5	22.6
9	13.0	14.2	10	1	0.024	0.100	7.88	0.39	13.6	13.6
10	14.2	15.3	10	1	0.024	0.100	7.92	0.39	14.7	13.7
11	15.3	16.4	6	1	0.024	0.167	7.94	0.51	15.9	17.7
12	16.4	17.5	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	17.0	0.0
13	17.5	18.7	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	18.1	0.0
Ferro										
1	19.9	31.4	6	1	0.027	0.167	7.77	0.52	25.7	28.6
2	31.4	43.0	7	0	0.000	0.000	0.00	0.00	37.2	0.0
3	43.0	54.5	15	3	0.081	0.200	8.38	1.07	48.8	58.6
4	54.5	66.1	18	5	0.135	0.278	8.06	1.56	60.3	85.7
5	66.1	77.6	10	1	0.027	0.100	8.69	0.45	71.9	24.8
6	77.6	89.2	12	3	0.081	0.250	8.40	1.20	83.4	65.7
7	89.2	100.7	30	7	0.189	0.233	8.52	1.79	95.0	98.2
8	100.7	112.3	12	1	0.027	0.083	9.50	0.45	106.5	24.8
9	112.3	123.8	20	4	0.108	0.200	8.68	1.28	118.0	70.0
10	123.8	135.4	14	5	0.135	0.357	8.29	1.82	129.6	100.0
11	135.4	146.9	5	1	0.027	0.200	7.88	0.58	141.1	31.8
12	146.9	158.5	7	3	0.081	0.429	8.69	1.62	152.7	89.0
13	158.5	170.0	6	3	0.081	0.500	8.44	1.70	164.2	93.3
Zinco										
1	9.5	11.8	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	10.7	0.0
2	11.8	14.2	13	3	0.075	0.231	7.91	1.04	13.0	53.5
3	14.2	16.5	19	4	0.100	0.211	8.49	1.23	15.3	63.3
4	16.5	18.9	22	6	0.150	0.273	8.53	1.72	17.7	88.6
5	18.9	21.2	17	6	0.150	0.353	8.46	1.95	20.0	100.0

6	21.2	23.5	25	6	0.150	0.240	8.58	1.63	22.4	83.6
7	23.5	25.9	21	4	0.100	0.190	8.44	1.16	24.7	59.8
8	25.9	28.2	14	5	0.125	0.357	8.47	1.79	27.0	91.9
9	28.2	30.5	11	2	0.050	0.182	8.86	0.84	29.4	43.4
10	30.5	32.9	6	1	0.025	0.167	8.16	0.53	31.7	27.1
11	32.9	35.2	8	2	0.050	0.250	8.34	0.93	34.1	47.9
12	35.2	37.6	1	0	0.000	0.000	0.00	0.00	36.4	0.0
13	37.6	39.9	5	1	0.025	0.200	10.47	0.74	38.7	38.1

Manganès

1	60.0	124.5	4	1.0	0.024	0.250	8.17	0.64	92.2	25.4
2	124.5	188.9	19	3.0	0.073	0.158	8.03	0.86	156.7	34.4
3	188.9	253.4	26	10.0	0.244	0.385	8.19	2.51	221.1	100.0
4	253.4	317.8	28	8.0	0.195	0.286	8.59	2.03	285.6	80.9
5	317.8	382.3	16	5.0	0.122	0.313	8.76	1.71	350.1	68.2
6	382.3	446.7	11	2.0	0.049	0.182	8.95	0.84	414.5	33.6
7	446.7	511.2	8	1.0	0.024	0.125	9.50	0.52	479.0	20.9
8	511.2	575.7	19	4.0	0.098	0.211	8.47	1.21	543.4	48.4
9	575.7	640.1	12	3.0	0.073	0.250	8.62	1.17	607.9	46.5
10	640.1	704.6	7	1.0	0.024	0.143	8.45	0.50	672.3	19.9
11	704.6	769.0	8	2.0	0.049	0.250	8.93	0.99	736.8	39.3
12	769.0	833.5	3	1.0	0.024	0.333	8.42	0.76	801.3	30.3
13	833.5	898.0	4	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	865.7	0.0

Boro

1	11.9	17.4	3	1	0.024	0.333	7.80	0.70	14.7	33.5
2	17.4	22.9	3	1	0.024	0.333	9.50	0.86	20.2	40.9
3	22.9	28.4	12	5	0.122	0.417	8.42	1.90	25.7	90.5
4	28.4	33.9	21	6	0.146	0.286	8.55	1.75	31.2	83.4
5	33.9	39.4	32	8	0.195	0.250	9.10	2.01	36.7	95.9
6	39.4	44.9	25	8	0.195	0.320	8.39	2.10	42.2	100.0
7	44.9	50.4	23	5	0.122	0.217	8.47	1.38	47.7	65.8
8	50.4	55.9	11	1	0.024	0.091	8.11	0.38	53.2	18.2
9	55.9	61.5	10	2	0.049	0.200	7.92	0.78	58.7	37.3
10	61.5	67.0	8	3	0.073	0.375	7.93	1.31	64.2	62.7
11	67.0	72.5	9	0	0.000	0.000	0.00	0.00	69.7	0.0
12	72.5	78.0	7	1	0.024	0.143	7.78	0.46	75.2	21.9
13	78.0	83.5	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	80.7	0.0

Tabela A8. Valores de Chance Matemática (ChM) estabelecidos para as diferentes classes de teores de nutrientes nas folhas de plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*) em PR.

Classe i	LI	LS	Ni	Ai	P (Ai/A)	P (Ai/Ni)	IMAHi	CHMi	Tmi	ChMiR
Nitrogênio										
1	15.7	16.8	5	2	0.054	0.400	6.50	0.96	16.2	38.0
2	16.8	17.9	5	1	0.027	0.200	7.26	0.53	17.3	21.2
3	17.9	19.0	14	3	0.081	0.214	7.30	0.96	18.5	38.3
4	19.0	20.1	9	2	0.054	0.222	6.93	0.76	19.6	30.2
5	20.1	21.3	11	6	0.162	0.545	7.06	2.10	20.7	83.5
6	21.3	22.4	21	10	0.270	0.476	7.01	2.52	21.8	100.0
7	22.4	23.5	14	5	0.135	0.357	7.01	1.54	23.0	61.2
8	23.5	24.6	12	5	0.135	0.417	7.05	1.67	24.1	66.5
9	24.6	25.8	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	25.2	0.0
10	25.8	26.9	6	1	0.027	0.167	6.73	0.45	26.3	18.0
11	26.9	28.0	14	2	0.054	0.143	6.71	0.59	27.4	23.4
Fósforo										
1	0.80	0.98	2	1	0.027	0.500	8.01	0.93	0.9	53.1
2	0.98	1.16	14	2	0.054	0.143	7.30	0.64	1.1	36.6
3	1.16	1.35	10	4	0.108	0.400	7.20	1.50	1.3	85.5
4	1.35	1.53	14	3	0.081	0.214	6.89	0.91	1.4	51.8
5	1.53	1.71	13	5	0.135	0.385	6.98	1.59	1.6	90.7
6	1.71	1.89	10	2	0.054	0.200	6.84	0.71	1.8	40.6
7	1.89	2.07	17	6	0.162	0.353	6.79	1.63	2.0	92.7
8	2.07	2.25	15	6	0.162	0.400	6.88	1.75	2.2	100.0
9	2.25	2.44	11	5	0.135	0.455	7.03	1.74	2.3	99.4
10	2.44	2.62	5	2	0.054	0.400	6.96	1.02	2.5	58.4
11	2.62	2.80	2	1	0.027	0.500	7.21	0.84	2.7	47.8
Potássio										
1	6.0	7.1	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	6.5	0.0
2	7.1	8.2	7	2	0.054	0.286	6.66	0.83	7.6	37.4
3	8.2	9.3	10	1	0.027	0.100	7.72	0.40	8.7	18.1
4	9.3	10.4	16	6	0.162	0.375	7.04	1.74	9.8	78.3
5	10.4	11.5	13	5	0.135	0.385	7.29	1.66	10.9	75.0
6	11.5	12.6	9	6	0.162	0.667	6.74	2.22	12.0	100.0
7	12.6	13.7	15	4	0.108	0.267	6.87	1.17	13.1	52.7
8	13.7	14.8	15	5	0.135	0.333	7.02	1.49	14.2	67.2
9	14.8	15.9	12	5	0.135	0.417	7.05	1.67	15.3	75.4
10	15.9	17.0	6	1	0.027	0.167	7.15	0.48	16.4	21.6
11	17.0	18.1	7	2	0.054	0.286	6.90	0.86	17.5	38.7
Cálcio										
1	3.9	4.7	4	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	4.3	0.0
2	4.7	5.5	14	2.0	0.054	0.143	7.22	0.63	5.1	24.0
3	5.5	6.3	18	7.0	0.189	0.389	6.67	1.81	5.9	68.3
4	6.3	7.1	20	6.0	0.162	0.300	6.87	1.52	6.7	57.2
5	7.1	7.9	19	5.0	0.135	0.263	6.99	1.32	7.5	49.8
6	7.9	8.6	12	8.0	0.216	0.667	6.97	2.65	8.3	100.0
7	8.6	9.4	7	4.0	0.108	0.571	7.10	1.77	9.0	66.7
8	9.4	10.2	7	3.0	0.081	0.429	7.55	1.41	9.8	53.1
9	10.2	11.0	6	1.0	0.027	0.167	6.74	0.45	10.6	17.1
10	11.0	11.8	0	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	11.4	0.0
11	11.8	12.6	6	1.0	0.027	0.167	8.11	0.54	12.2	20.6
Magnésio										
1	1.5	1.7	8	1	0.029	0.125	7.08	0.42	1.6	19.7
2	1.7	2.0	9	1	0.029	0.111	6.84	0.39	1.9	17.9
3	2.0	2.2	13	5	0.143	0.385	6.92	1.62	2.1	75.5
4	2.2	2.5	14	5	0.143	0.357	6.90	1.56	2.3	72.5
5	2.5	2.7	31	10	0.286	0.323	7.08	2.15	2.6	100.0
6	2.7	2.9	8	3	0.086	0.375	6.76	1.21	2.8	56.4
7	2.9	3.2	7	2	0.057	0.286	6.50	0.83	3.1	38.6
8	3.2	3.4	11	4	0.114	0.364	6.91	1.41	3.3	65.5
9	3.4	3.7	6	3	0.086	0.500	7.61	1.58	3.5	73.3

10	3.7	3.9	3	1	0.029	0.333	6.92	0.68	3.8	31.4
Enxofre										
1	1.10	1.20	7	1	0.027	0.143	6.45	0.40	1.2	15.9
2	1.20	1.30	17	4	0.108	0.235	7.42	1.18	1.3	47.0
3	1.30	1.40	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	1.4	0.0
4	1.40	1.50	9	1	0.027	0.111	8.11	0.44	1.5	17.6
5	1.50	1.60	16	6	0.162	0.375	6.97	1.72	1.6	68.2
6	1.60	1.70	22	5	0.135	0.227	7.11	1.25	1.7	49.5
7	1.70	1.80	13	8	0.216	0.615	6.91	2.52	1.8	100.0
8	1.80	1.90	6	4	0.108	0.667	6.82	1.83	1.9	72.6
9	1.90	2.00	4	2	0.054	0.500	6.73	1.11	2.0	43.9
10	2.00	2.10	12	5	0.135	0.417	6.90	1.64	2.1	65.0
11	2.10	2.20	2	1	0.027	0.500	6.82	0.79	2.2	31.5
Cobre										
1	4.0	4.5	4	1	0.027	0.250	7.11	0.58	4.3	32.0
2	4.5	5.1	12	2	0.054	0.167	7.28	0.69	4.8	37.9
3	5.1	5.6	0	0	0.000	0.000	0.00	0.00	5.4	0.0
4	5.6	6.2	22	6	0.162	0.273	7.31	1.54	5.9	84.3
5	6.2	6.7	1	1	0.027	1.000	6.49	1.07	6.5	58.5
6	6.7	7.3	31	9	0.243	0.290	6.87	1.82	7.0	100.0
7	7.3	7.8	3	2	0.054	0.667	6.99	1.33	7.5	72.7
8	7.8	8.4	17	6	0.162	0.353	7.13	1.71	8.1	93.5
9	8.4	8.9	3	2	0.054	0.667	6.83	1.30	8.6	71.1
10	8.9	9.5	9	4	0.108	0.444	6.79	1.49	9.2	81.5
11	9.5	10.0	11	4	0.108	0.364	6.88	1.36	9.7	74.8
Ferro										
1	30.0	38.0	3	0	0.000	0.000	0.00	0.00	34.0	0.0
2	38.0	46.0	11	2	0.054	0.182	7.03	0.70	42.0	31.6
3	46.0	54.0	13	4	0.108	0.308	6.86	1.25	50.0	56.7
4	54.0	62.0	25	6	0.162	0.240	6.86	1.35	58.0	61.3
5	62.0	70.0	18	8	0.216	0.444	7.12	2.21	66.0	100.0
6	70.0	78.0	14	4	0.108	0.286	6.75	1.19	74.0	53.7
7	78.0	86.0	8	4	0.108	0.500	6.99	1.63	82.0	73.7
8	86.0	94.0	6	3	0.081	0.500	6.58	1.32	90.0	60.0
9	94.0	102.0	2	2	0.054	1.000	7.13	1.66	98.0	75.1
10	102.0	110.0	7	2	0.054	0.286	7.61	0.95	106.0	42.9
11	110.0	118.0	6	2	0.054	0.333	7.56	1.02	114.0	46.0
Zinco										
1	9.0	10.9	2	1	0.027	0.500	6.45	0.75	10.0	32.2
2	10.9	12.8	8	1	0.027	0.125	8.01	0.47	11.9	20.0
3	12.8	14.7	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	13.8	0.0
4	14.7	16.6	28	7	0.189	0.250	7.04	1.53	15.7	65.7
5	16.6	18.5	16	8	0.216	0.500	7.09	2.33	17.6	100.0
6	18.5	20.5	14	5	0.135	0.357	6.91	1.52	19.5	65.1
7	20.5	22.4	10	4	0.108	0.400	7.09	1.47	21.4	63.2
8	22.4	24.3	13	6	0.162	0.462	6.73	1.84	23.3	78.9
9	24.3	26.2	7	2	0.054	0.286	6.91	0.86	25.2	36.8
10	26.2	28.1	6	1	0.027	0.167	7.21	0.48	27.1	20.7
11	28.1	30.0	5	2	0.054	0.400	7.09	1.04	29.0	44.7
Manganês										
1	89.0	244.5	6	1.0	0.027	0.167	6.49	0.44	166.8	20.7
2	244.5	400.1	14	3.0	0.081	0.214	6.85	0.90	322.3	42.9
3	400.1	555.6	15	5.0	0.135	0.333	6.86	1.46	477.9	69.1
4	555.6	711.2	19	6.0	0.162	0.316	6.99	1.58	633.4	75.1
5	711.2	866.7	22	6.0	0.162	0.273	7.13	1.50	789.0	71.2
6	866.7	1022.3	8	5.0	0.135	0.625	7.25	2.11	944.5	100.0
7	1022.3	1177.8	6	2.0	0.054	0.333	7.21	0.97	1100.0	46.0
8	1177.8	1333.4	9	5.0	0.135	0.556	6.91	1.89	1255.6	89.9
9	1333.4	1488.9	3	1.0	0.027	0.333	7.49	0.71	1411.1	33.7
10	1488.9	1644.5	2	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1566.7	0.0

11	1644.5	1800.0	8	3.0	0.081	0.375	6.73	1.17	1722.2	55.7
					Boro					
1	13.0	16.5	4	1	0.029	0.250	6.47	0.55	14.7	24.4
2	16.5	19.9	5	2	0.057	0.400	6.85	1.04	18.2	46.1
3	19.9	23.4	26	10	0.286	0.385	6.77	2.24	21.6	100.0
4	23.4	26.8	17	7	0.200	0.412	7.06	2.03	25.1	90.3
5	26.8	30.3	20	7	0.200	0.350	6.92	1.83	28.5	81.6
6	30.3	33.7	9	2	0.057	0.222	7.16	0.81	32.0	36.0
7	33.7	37.2	9	1	0.029	0.111	7.12	0.40	35.5	17.9
8	37.2	40.6	5	2	0.057	0.400	6.89	1.04	38.9	46.5
9	40.6	44.1	8	2	0.057	0.250	7.23	0.86	42.4	38.5
10	44.1	47.5	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	45.8	0.0
11	47.5	51.0	6	1	0.029	0.167	7.49	0.52	49.3	23.0

Tabela A9. Valores de Chance Matemática (ChM) estabelecidos para as diferentes classes de teores de nutrientes nas folhas de plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*), usando conjuntamente dados de MG, SP e PR.

Classe i	LI	LS	Ni	Ai	P (Ai/A)	P (Ai/Ni)	IMAHi	CHMi	Tmi	ChMiR
Nitrogênio										
1	12.5	14.0	6	0	0.000	0.000	0.00	0.00	13.3	0.0
2	14.0	15.5	17	6	0.045	0.353	7.66	0.97	14.7	50.9
3	15.5	17.0	29	5	0.038	0.172	7.78	0.63	16.2	33.0
4	17.0	18.5	39	7	0.053	0.179	7.49	0.73	17.7	38.3
5	18.5	20.0	37	12	0.091	0.324	7.68	1.32	19.2	69.1
6	20.0	21.5	51	13	0.098	0.255	7.79	1.23	20.7	64.7
7	21.5	23.0	48	12	0.091	0.250	7.88	1.19	22.2	62.3
8	23.0	24.5	59	18	0.136	0.305	7.60	1.55	23.7	81.3
9	24.5	26.0	30	9	0.068	0.300	7.88	1.13	25.2	59.1
10	26.0	27.5	43	14	0.106	0.326	8.12	1.51	26.7	79.2
11	27.5	29.0	23	10	0.076	0.435	8.10	1.47	28.2	77.1
12	29.0	30.5	14	10	0.076	0.714	8.20	1.91	29.7	100.0
13	30.5	32.0	15	10	0.076	0.667	7.88	1.77	31.2	92.9
14	32.0	33.5	10	6	0.045	0.600	8.14	1.34	32.7	70.5
15	33.5	35.0	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	34.2	0.0
Fósforo										
1	0.6	0.7	14	2	0.015	0.143	7.58	0.35	0.6	15.6
2	0.7	0.9	50	16	0.122	0.320	7.73	1.53	0.8	67.5
3	0.9	1.0	52	10	0.076	0.192	8.25	1.00	0.9	44.1
4	1.0	1.2	71	23	0.176	0.324	7.56	1.80	1.1	79.7
5	1.2	1.3	72	27	0.206	0.375	8.07	2.24	1.2	99.1
6	1.3	1.5	42	21	0.160	0.500	8.00	2.26	1.4	100.0
7	1.5	1.6	37	14	0.107	0.378	7.83	1.57	1.5	69.5
8	1.6	1.8	24	11	0.084	0.458	7.81	1.53	1.7	67.6
9	1.8	1.9	16	3	0.023	0.188	7.78	0.51	1.8	22.5
10	1.9	2.1	13	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.0	0.0
11	2.1	2.2	15	2	0.015	0.133	7.42	0.33	2.1	14.8
12	2.2	2.4	6	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.3	0.0
13	2.4	2.5	8	1	0.008	0.125	7.36	0.23	2.4	10.0
14	2.5	2.7	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	2.6	0.0
15	2.7	2.8	2	1	0.008	0.500	7.21	0.45	2.7	19.7
Potássio										
1	3.4	4.4	16	2	0.015	0.125	7.37	0.32	3.9	13.1
2	4.4	5.4	31	7	0.053	0.226	8.02	0.88	4.9	35.9
3	5.4	6.3	21	2	0.015	0.095	8.15	0.31	5.8	12.7
4	6.3	7.3	47	14	0.106	0.298	7.56	1.34	6.8	55.0
5	7.3	8.3	56	25	0.189	0.446	7.62	2.21	7.8	90.7
6	8.3	9.3	65	28	0.212	0.431	8.08	2.44	8.8	100.0
7	9.3	10.2	44	18	0.136	0.409	8.13	1.92	9.8	78.7
8	10.2	11.2	60	24	0.182	0.400	7.88	2.12	10.7	87.0
9	11.2	12.2	27	5	0.038	0.185	7.82	0.66	11.7	26.8
10	12.2	13.2	17	2	0.015	0.118	8.28	0.35	12.7	14.3
11	13.2	14.1	16	2	0.015	0.125	7.40	0.32	13.7	13.2
12	14.1	15.1	10	3	0.023	0.300	7.27	0.60	14.6	24.6
13	15.1	16.1	8	0	0.000	0.000	0.00	0.00	15.6	0.0
14	16.1	17.1	2	0	0.000	0.000	0.00	0.00	16.6	0.0
15	17.1	18.1	5	0	0.000	0.000	0.00	0.00	17.6	0.0
Cálcio										
1	2.8	3.4	14	4.0	0.031	0.286	7.38	0.69	3.1	25.9
2	3.4	4.1	39	15.0	0.115	0.385	7.46	1.57	3.8	58.8
3	4.1	4.8	60	23.0	0.176	0.383	7.74	2.01	4.5	75.4
4	4.8	5.5	64	31.0	0.237	0.484	7.86	2.66	5.2	100.0
5	5.5	6.2	58	18.0	0.137	0.310	8.55	1.77	5.9	66.3
6	6.2	6.9	39	12.0	0.092	0.308	7.72	1.30	6.6	48.7
7	6.9	7.6	32	4.0	0.031	0.125	7.97	0.49	7.3	18.5
8	7.6	8.3	29	3.0	0.023	0.103	7.89	0.38	8.0	14.4

9	8.3	9.0	25	7.0	0.053	0.280	7.47	0.91	8.7	34.3
10	9.0	9.7	16	3.0	0.023	0.188	7.74	0.51	9.4	19.0
11	9.7	10.4	15	6.0	0.046	0.400	7.93	1.07	10.0	40.3
12	10.4	11.1	14	2.0	0.015	0.143	8.29	0.39	10.7	14.5
13	11.1	11.8	8	3.0	0.023	0.375	8.14	0.75	11.4	28.3
14	11.8	12.5	8	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	12.1	0.0
15	12.5	13.2	3	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	12.8	0.0
Magnésio										
1	1.5	1.7	11	1	0.008	0.091	7.72	0.20	1.6	9.4
2	1.7	1.8	11	1	0.008	0.091	7.55	0.20	1.7	9.2
3	1.8	2.0	25	12	0.092	0.480	7.68	1.61	1.9	74.3
4	2.0	2.1	35	8	0.061	0.229	7.65	0.90	2.1	41.7
5	2.1	2.3	49	11	0.084	0.224	7.85	1.08	2.2	49.7
6	2.3	2.5	57	11	0.084	0.193	7.54	0.96	2.4	44.3
7	2.5	2.6	45	9	0.069	0.200	7.93	0.93	2.5	42.9
8	2.6	2.8	50	10	0.076	0.200	7.63	0.94	2.7	43.5
9	2.8	2.9	30	15	0.115	0.500	8.12	1.94	2.9	89.7
10	2.9	3.1	35	16	0.122	0.457	7.94	1.88	3.0	86.6
11	3.1	3.3	29	17	0.130	0.586	7.86	2.17	3.2	100.0
12	3.3	3.4	20	7	0.053	0.350	8.07	1.10	3.3	50.9
13	3.4	3.6	15	11	0.084	0.733	7.91	1.96	3.5	90.6
14	3.6	3.7	6	2	0.015	0.333	8.80	0.63	3.7	29.0
15	3.7	3.9	4	0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.8	0.0
Enxofre										
1	0.3	0.4	2	2	0.016	1.000	7.17	0.89	0.3	41.3
2	0.4	0.5	10	3	0.023	0.300	7.26	0.61	0.5	28.1
3	0.5	0.7	7	3	0.023	0.429	7.38	0.74	0.6	34.1
4	0.7	0.8	24	8	0.062	0.333	7.59	1.09	0.8	50.5
5	0.8	1.0	12	4	0.031	0.333	8.36	0.85	0.9	39.4
6	1.0	1.1	42	20	0.155	0.476	7.95	2.16	1.0	100.0
7	1.1	1.2	67	24	0.186	0.358	7.94	2.05	1.2	94.9
8	1.2	1.4	90	24	0.186	0.267	7.77	1.73	1.3	80.1
9	1.4	1.5	46	9	0.070	0.196	7.94	0.93	1.5	42.9
10	1.5	1.7	30	9	0.070	0.300	7.65	1.11	1.6	51.2
11	1.7	1.8	39	6	0.047	0.154	7.51	0.64	1.7	29.4
12	1.8	1.9	14	5	0.039	0.357	8.46	1.00	1.9	46.1
13	1.9	2.1	12	2	0.016	0.167	8.04	0.41	2.0	18.9
14	2.1	2.2	19	5	0.039	0.263	7.68	0.78	2.2	35.9
15	2.2	2.4	6	5	0.039	0.833	7.67	1.38	2.3	63.8
Cobre										
1	3.1	4.3	23	9	0.069	0.391	7.65	1.26	3.7	67.7
2	4.3	5.5	46	15	0.115	0.326	7.98	1.55	4.9	83.3
3	5.5	6.7	55	14	0.108	0.255	8.08	1.34	6.1	72.0
4	6.7	7.9	58	20	0.154	0.345	8.02	1.85	7.3	99.4
5	7.9	9.1	45	15	0.115	0.333	8.10	1.59	8.5	85.5
6	9.1	10.3	30	10	0.077	0.333	7.92	1.27	9.7	68.3
7	10.3	11.5	22	13	0.100	0.591	7.64	1.86	10.9	100.0
8	11.5	12.7	18	8	0.062	0.444	7.65	1.26	12.1	68.0
9	12.7	13.9	19	4	0.031	0.211	7.58	0.61	13.3	32.8
10	13.9	15.1	23	6	0.046	0.261	7.40	0.81	14.5	43.7
11	15.1	16.3	16	4	0.031	0.250	7.69	0.67	15.7	36.3
12	16.3	17.5	20	3	0.023	0.150	8.05	0.47	16.9	25.5
13	17.5	18.7	22	1	0.008	0.045	7.39	0.14	18.1	7.4
14	18.7	19.9	17	2	0.015	0.118	8.25	0.35	19.3	18.9
15	19.9	21.1	9	6	0.046	0.667	7.53	1.32	20.5	71.1
Ferro										
1	19.9	35.4	11	3	0.024	0.273	7.40	0.60	27.7	26.2
2	35.4	51.0	39	13	0.103	0.333	7.81	1.45	43.2	63.7
3	51.0	66.5	78	17	0.135	0.218	7.72	1.32	58.8	58.2
4	66.5	82.1	51	15	0.119	0.294	7.64	1.43	74.3	62.9
5	82.1	97.6	54	24	0.190	0.444	7.82	2.27	89.9	100.0

6	97.6	113.2	37	9	0.071	0.243	7.76	1.02	105.4	45.0
7	113.2	128.7	41	14	0.111	0.341	7.86	1.53	120.9	67.3
8	128.7	144.3	24	9	0.071	0.375	7.99	1.31	136.5	57.5
9	144.3	159.8	18	7	0.056	0.389	8.06	1.19	152.0	52.1
10	159.8	175.3	21	6	0.048	0.286	8.28	0.97	167.6	42.5
11	175.3	190.9	11	4	0.032	0.364	7.81	0.84	183.1	36.9
12	190.9	206.4	9	2	0.016	0.222	7.97	0.47	198.7	20.8
13	206.4	222.0	7	1	0.008	0.143	7.51	0.25	214.2	11.1
14	222.0	237.5	9	1	0.008	0.111	7.25	0.22	229.8	9.5
15	237.5	253.1	7	1	0.008	0.143	7.76	0.26	245.3	11.5

Zinco

1	2.4	4.9	7	0	0.000	0.000	0.00	0.00	3.6	0.0
2	4.9	7.4	20	0	0.000	0.000	0.00	0.00	6.1	0.0
3	7.4	9.9	36	5	0.038	0.139	7.55	0.55	8.6	29.0
4	9.9	12.4	41	18	0.138	0.439	7.66	1.89	11.1	99.2
5	12.4	14.9	54	20	0.154	0.370	7.81	1.86	13.6	98.0
6	14.9	17.4	61	12	0.092	0.197	7.92	1.07	16.1	56.1
7	17.4	19.9	36	12	0.092	0.333	8.10	1.42	18.6	74.7
8	19.9	22.4	54	20	0.154	0.370	7.97	1.90	21.1	100.0
9	22.4	24.9	39	8	0.062	0.205	7.59	0.85	23.6	44.8
10	24.9	27.4	30	13	0.100	0.433	7.80	1.62	26.1	85.3
11	27.4	29.9	18	8	0.062	0.444	8.41	1.39	28.6	73.1
12	29.9	32.4	9	5	0.038	0.556	7.53	1.10	31.1	57.9
13	32.4	34.9	9	7	0.054	0.778	7.64	1.56	33.6	82.2
14	34.9	37.4	2	1	0.008	0.500	8.23	0.51	36.1	26.8
15	37.4	39.9	5	1	0.008	0.200	7.65	0.30	38.6	15.8

Manganês

1	60.0	176.0	28	12.0	0.092	0.429	7.60	1.51	118.0	57.0
2	176.0	292.0	90	36.0	0.277	0.400	7.97	2.65	234.0	100.0
3	292.0	408.0	63	26.0	0.200	0.413	7.99	2.30	350.0	86.6
4	408.0	524.0	60	19.0	0.146	0.317	7.71	1.66	466.0	62.6
5	524.0	640.0	61	19.0	0.146	0.311	7.88	1.68	582.0	63.4
6	640.0	756.0	43	8.0	0.062	0.186	7.82	0.84	698.0	31.6
7	756.0	872.0	24	4.0	0.031	0.167	7.71	0.55	814.0	20.8
8	872.0	988.0	14	2.0	0.015	0.143	7.79	0.36	930.0	13.8
9	988.0	1104.0	14	2.0	0.015	0.143	7.86	0.37	1046.0	13.9
10	1104.0	1220.0	5	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1162.0	0.0
11	1220.0	1336.0	4	1.0	0.008	0.250	7.26	0.32	1278.0	12.0
12	1336.0	1452.0	3	1.0	0.008	0.333	7.49	0.38	1394.0	14.3
13	1452.0	1568.0	0	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1510.0	0.0
14	1568.0	1684.0	3	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1626.0	0.0
15	1684.0	1800.0	7	0.0	0.000	0.000	0.00	0.00	1742.0	0.0

Boro

1	13.0	19.4	11	1	0.008	0.091	7.58	0.21	16.2	9.8
2	19.4	25.8	55	10	0.081	0.182	7.81	0.95	22.6	45.0
3	25.8	32.1	69	23	0.187	0.333	7.92	1.98	28.9	93.7
4	32.1	38.5	68	21	0.171	0.309	7.87	1.81	35.3	85.7
5	38.5	44.9	53	21	0.171	0.396	8.11	2.11	41.7	100.0
6	44.9	51.3	46	18	0.146	0.391	7.82	1.87	48.1	88.7
7	51.3	57.6	25	9	0.073	0.360	7.66	1.24	54.5	58.9
8	57.6	64.0	21	6	0.049	0.286	7.57	0.89	60.8	42.4
9	64.0	70.4	21	6	0.049	0.286	7.60	0.90	67.2	42.5
10	70.4	76.8	15	2	0.016	0.133	7.51	0.35	73.6	16.6
11	76.8	83.2	10	2	0.016	0.200	7.54	0.43	80.0	20.4
12	83.2	89.5	6	1	0.008	0.167	7.29	0.27	86.3	12.7
13	89.5	95.9	0	0	0.000	0.000	0.00	0.00	92.7	0.0
14	95.9	102.3	6	1	0.008	0.167	7.51	0.28	99.1	13.1
15	102.3	108.7	4	2	0.016	0.500	7.32	0.66	105.5	31.3

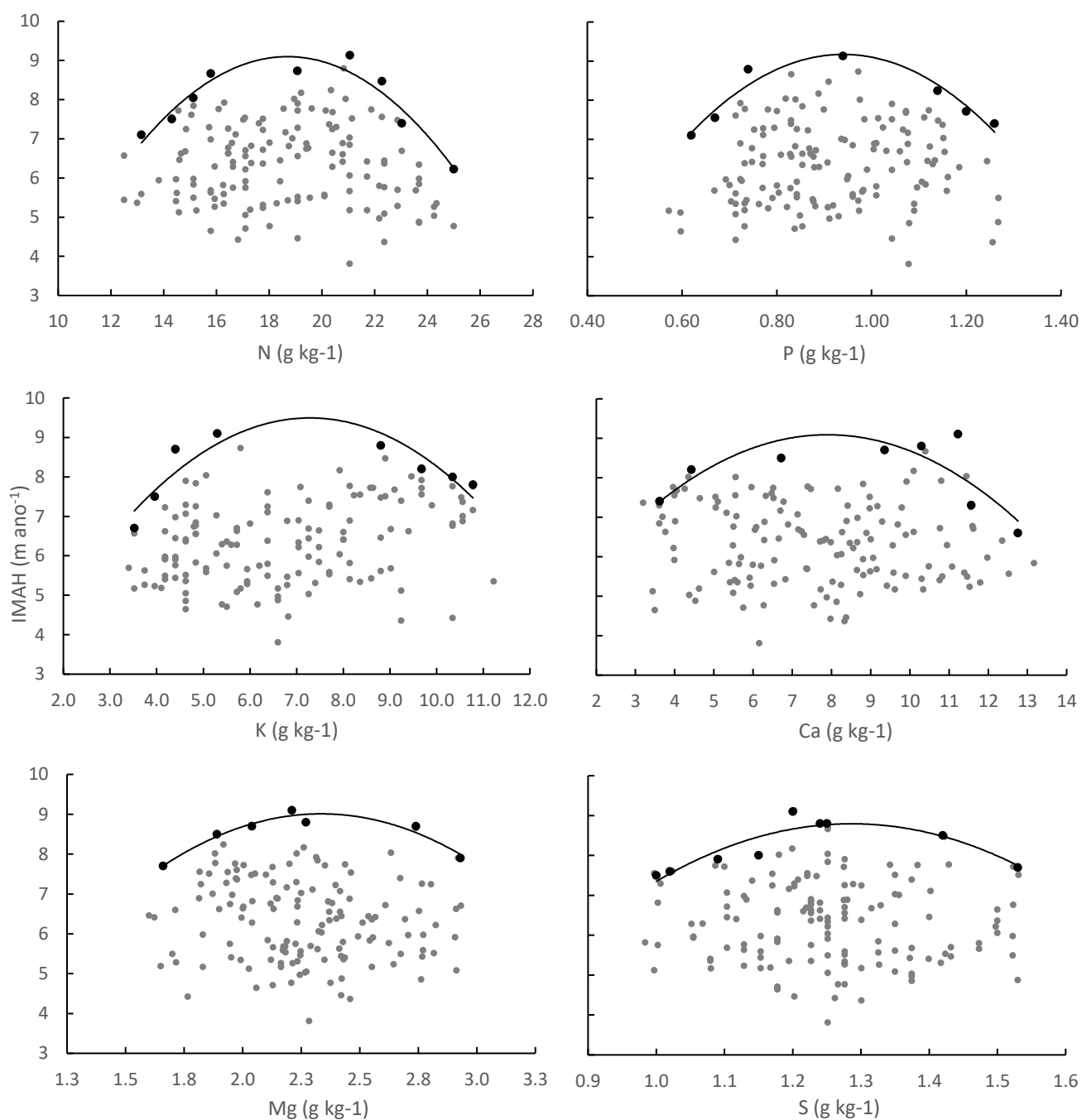


Figura A1. Relação entre os teores foliares de dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em MG, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

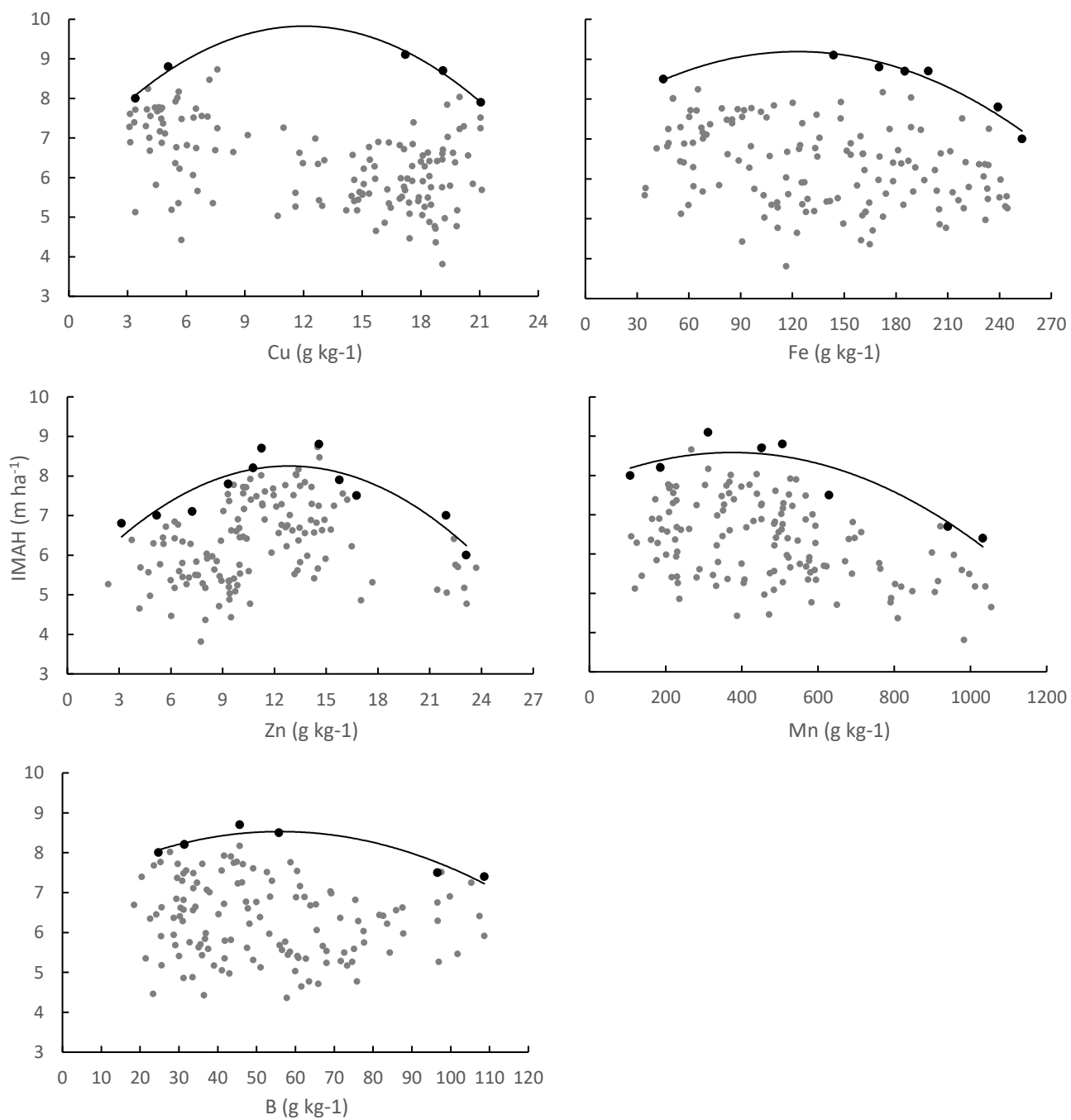


Figura A2. Relação entre os teores foliares de dos micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn, B) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em MG, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

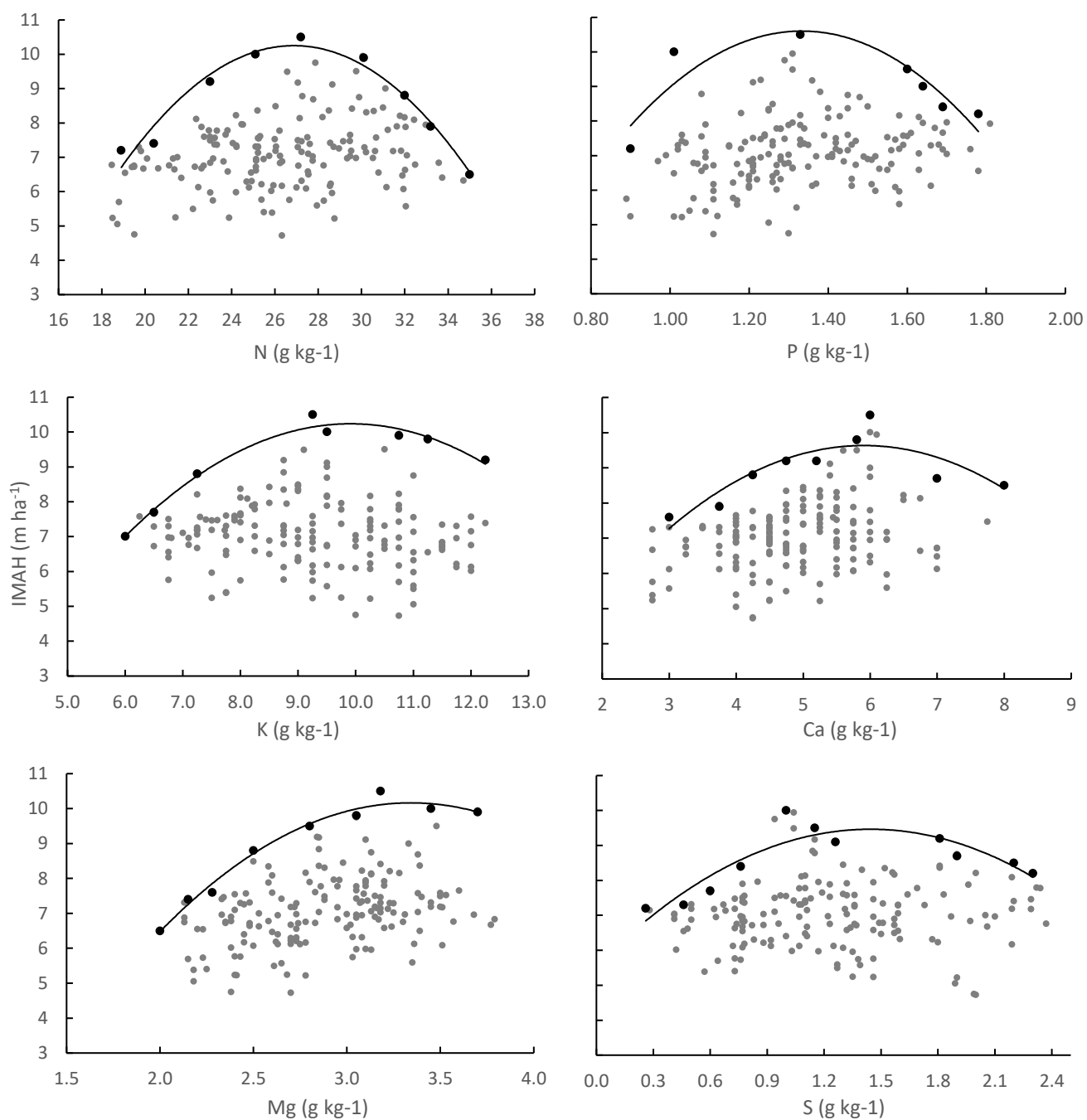


Figura A3. Relação entre os teores foliares de dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em SP, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

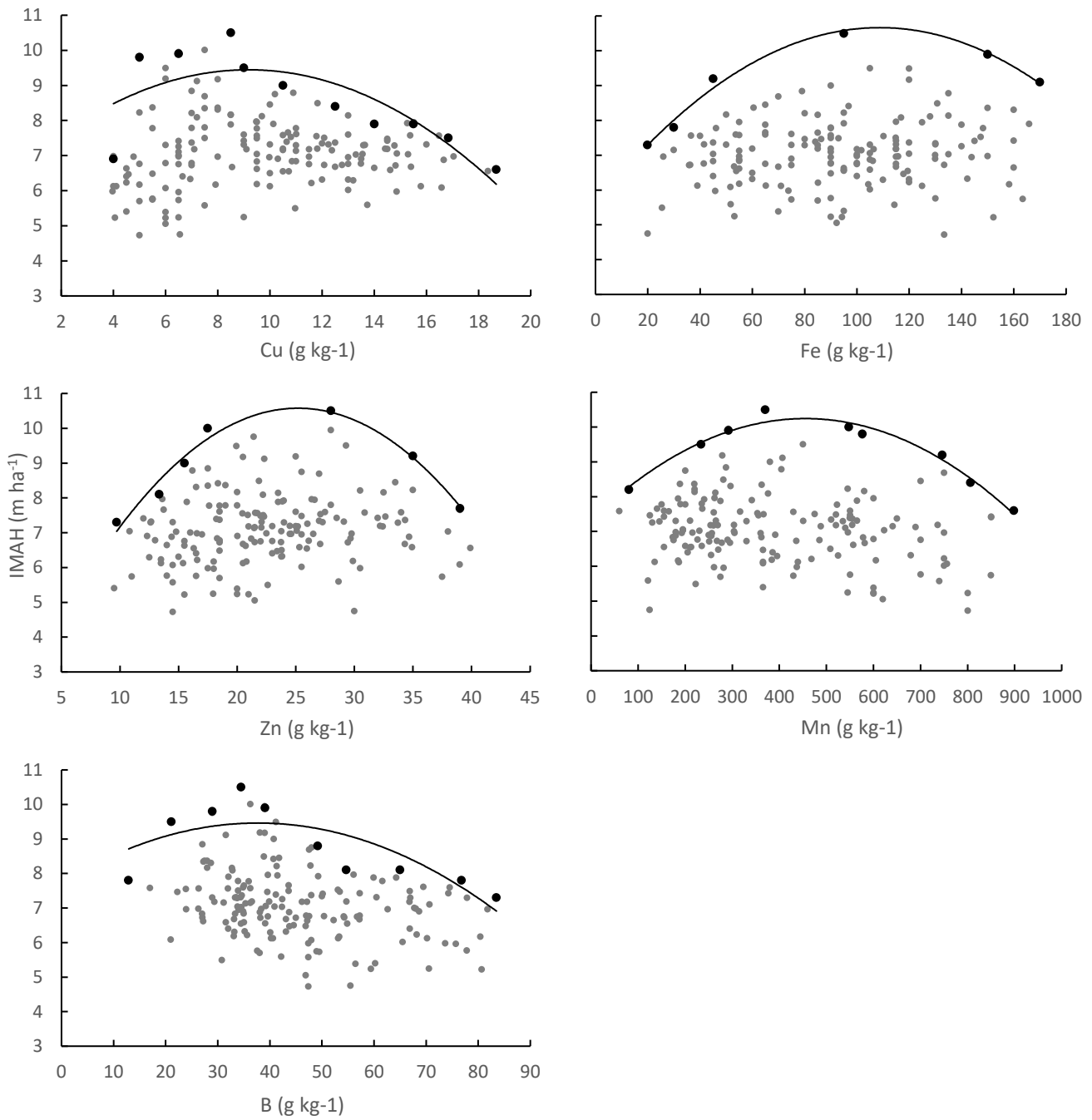


Figura A4. Relação entre os teores foliares de dos micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn, B) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em SP, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

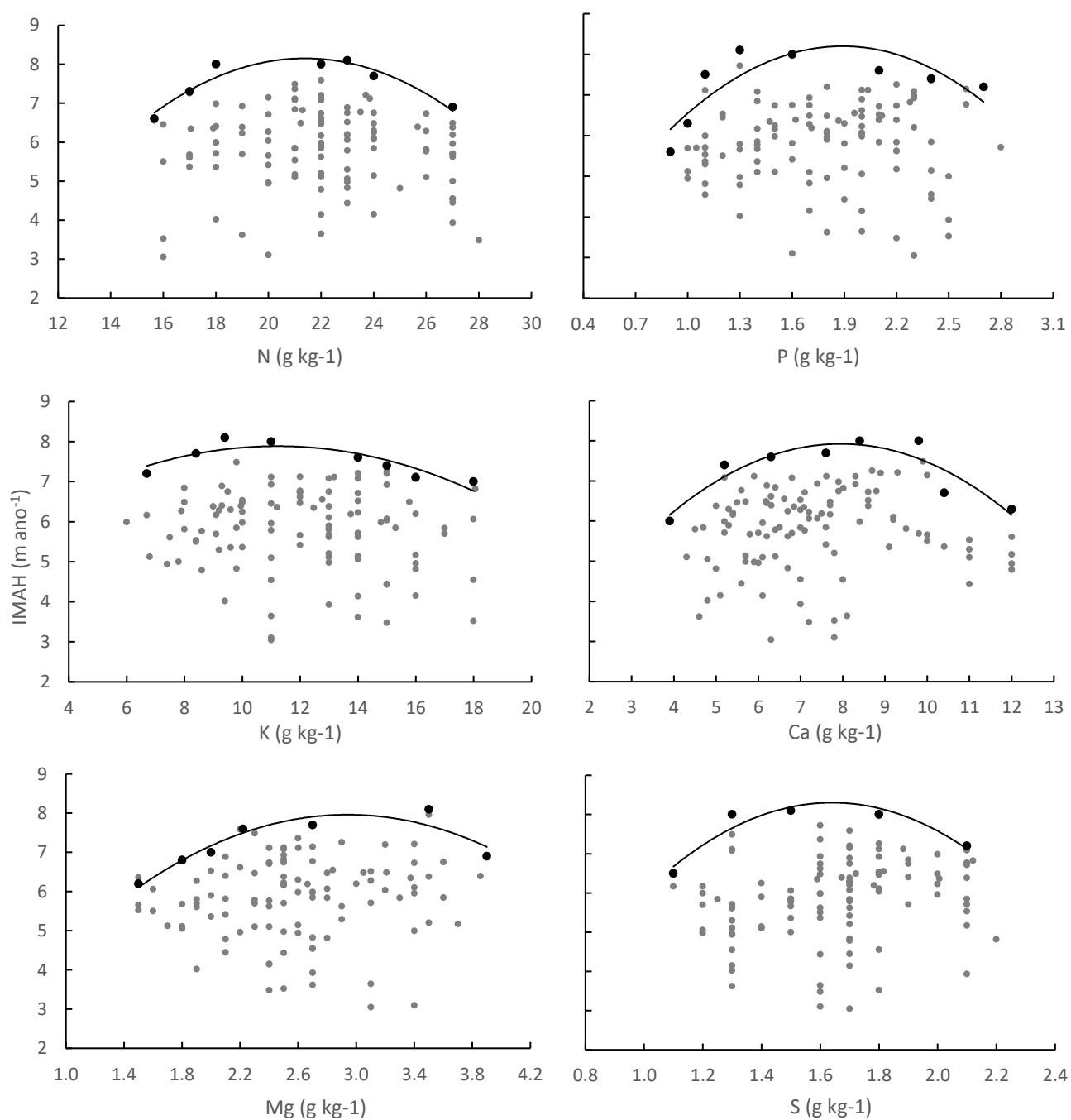


Figura A5. Relação entre os teores foliares de dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em PR, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

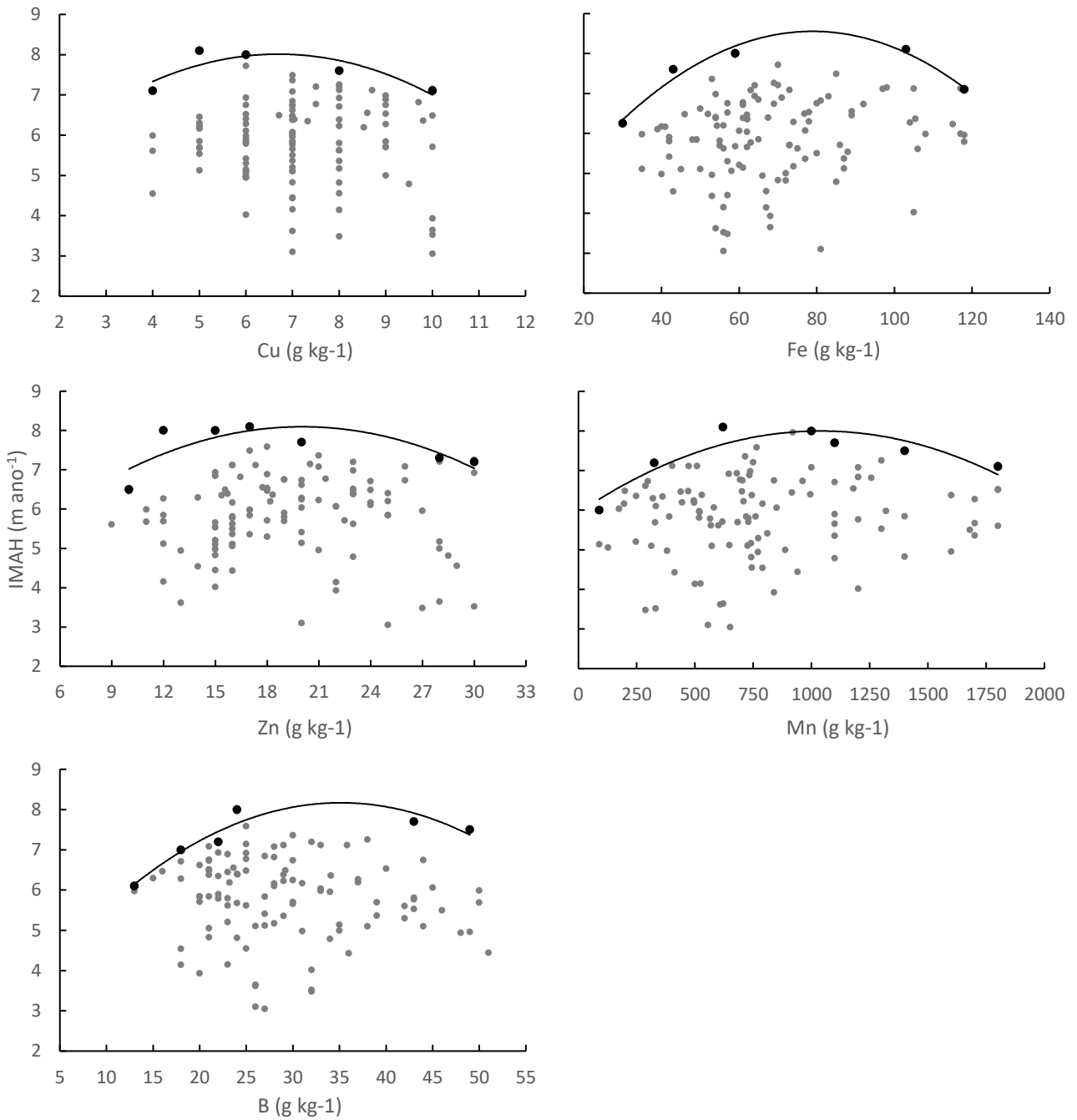


Figura A6. Relação entre os teores foliares de dos micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn, B) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em PR, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

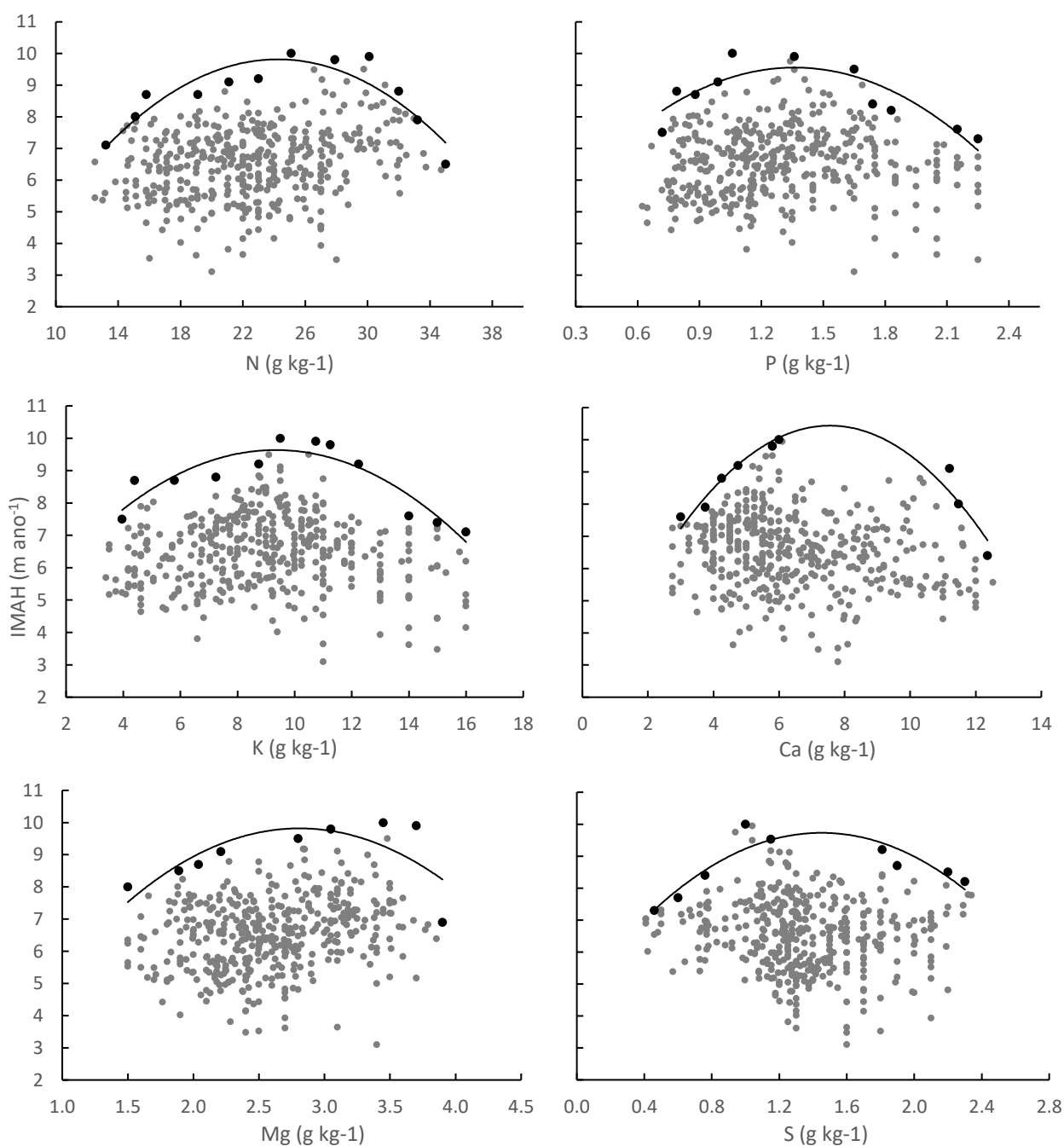


Figura A7. Relação entre os teores foliares de dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade com todo o conjunto de dados, destacando as linhas da fronteira e os pontos seleccionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).

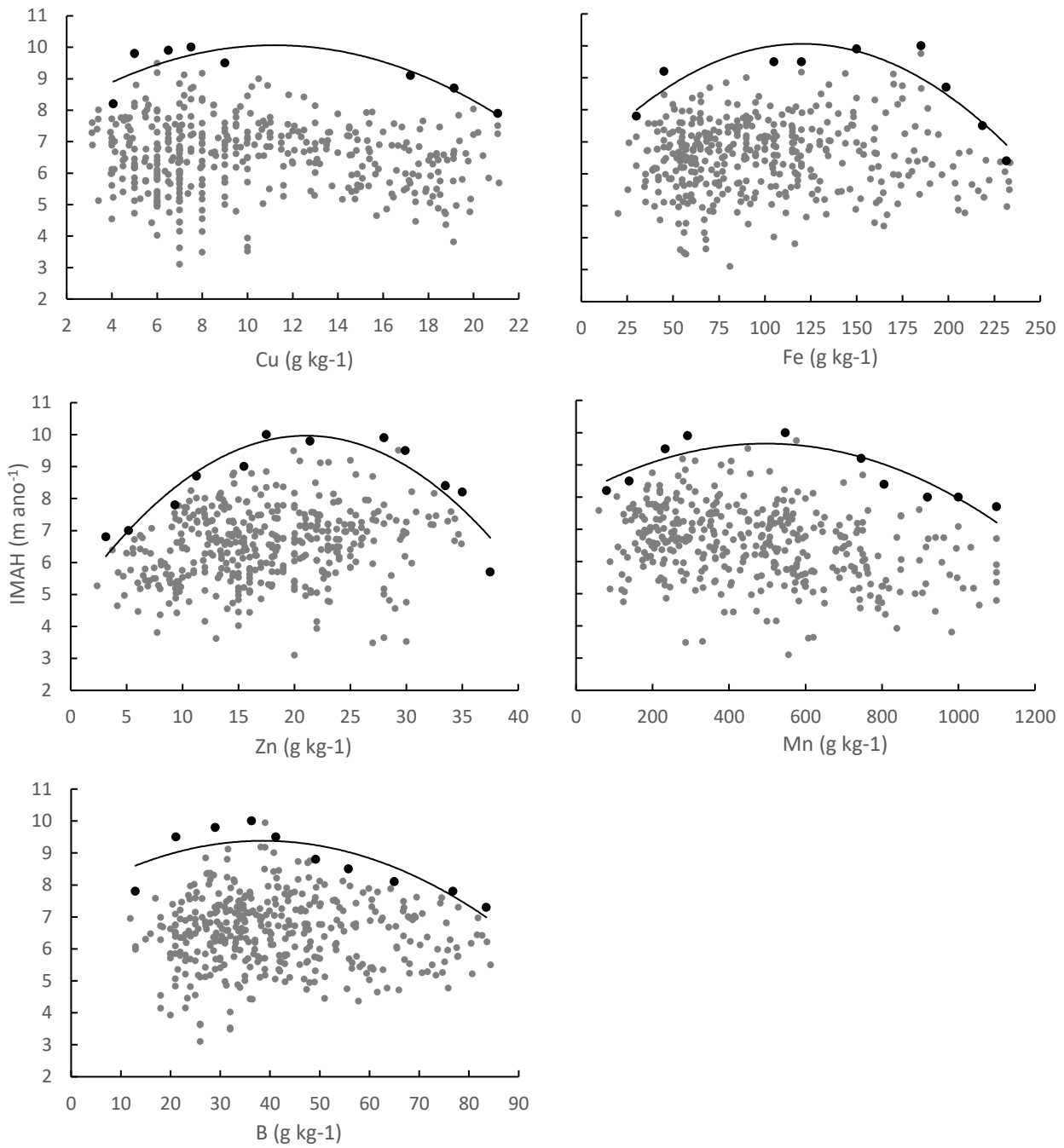


Figura A8. Relação entre os teores foliares de dos micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn, B) e o crescimento em altura (IMAH) de plantios do clone AEC144 entre 12 e 24 meses de idade em todo o conjunto de dados, destacando as linhas da fronteira e os pontos selecionados para o ajuste das equações de regressão (Tabela 14).