

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E TROCAS GASOSAS EM PLANTAS JOVENS DE
Corymbia spp.**

Iale de Castro Almeida
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

IALE DE CASTRO ALMEIDA

**EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E TROCAS GASOSAS EM PLANTAS JOVENS DE
Corymbia spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Julio Cesar Lima Neves

Coorientador: Gleison Augusto dos Santos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447e
2024 Almeida, Iale de Castro, 1997-
Eficiência nutricional e trocas gasosas em plantas jovens de
Corymbia spp / Iale de Castro Almeida. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (99 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Júlio César Lima Neves.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2024.

Referências bibliográficas: f. 89-99.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.031>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Corymbia* (Myrtaceae) - Fisiologia. 2. *Corymbia*
(Myrtaceae) - Nutrição. 3. Genética vegetal. I. Neves, Júlio
César Lima, 1955-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 571.23765

IALE DE CASTRO ALMEIDA

**EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E TROCAS GASOSAS EM PLANTAS JOVENS DE
Corymbia spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de agosto de 2024.

Assentimento:

Iale de Castro Almeida
Autora

Julio Cesar Lima Neves
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 28/01/2025 às 12:27:50 e pelo orientador em 28/01/2025 às 12:43:22. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3MKU.NP9E.MZXZ** e clique no botão 'Validar documento'.

À Risa, minha maior inspiração.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Risa, que sempre me incentivou a seguir o meu caminho e por ser meu alicerce. Ao meu pai, Wilson, pelo apoio incondicional.

À Iane e Ilana, que estiveram em minhas orações e me deram todo suporte necessário.

Aos meus padrinhos, Geisa e Élcio, e ao meu afilhado, Ian, pela dedicação e amor.

À toda minha família pelo carinho. À Matheus e sua família por sempre estarem comigo.

Aos meus amigos, da Engenharia Florestal, de Viçosa, em especial aos do Castelo Branco e da vida, por me abraçarem em toda minha trajetória. A todos os amigos do Prata por estarem sempre comigo e me motivarem.

À Drielle, Sarah e Thamires, por toda ajuda durante a condução do experimento. A todos do viveiro pelo apoio durante a produção de mudas.

Ao professor Júlio Neves pelos ensinamentos, conselhos e orientação.

Aos técnicos e servidores do Departamento de Solos pela disponibilidade e sugestões durante todo o trabalho, sem eles nada seria possível. Aos colegas do Departamento de Solos, pelas conversas, ajudas e distrações durante o mestrado.

À Universidade Federal de Viçosa e ao programa de Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Aprender é descobrir o que você já sabe. Fazer é demonstrar que você o sabe.
Ensinar é lembrar aos outros que eles sabem tanto quanto você.”
(Richard Bach)

RESUMO

ALMEIDA, Iale de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024. **EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E TROCAS GASOSAS EM PLANTAS JOVENS DE *Corymbia* spp.**. Orientador: Julio Cesar Lima Neves. Coorientador: Gleison Augusto dos Santos.

A eficiência no uso de carbono e nutrientes minerais em espécies do gênero *Corymbia* é essencial para subsidiar programas de melhoramento genético e orientar o manejo nutricional, embora ainda seja pouco explorada na literatura. Este trabalho abrange três estudos com objetivos distintos: (1) avaliar a eficiência de utilização de carbono e nutrientes minerais para a produção de área foliar em materiais genéticos de *Corymbia* spp. em minijardim clonal; (2) analisar parâmetros morfológicos e fisiológicos de mudas de clones de *Corymbia* spp.; e (3) investigar as eficiências de absorção, utilização e translocação de macronutrientes em mudas do gênero. No estudo 1, folhas de 53 materiais genéticos de *Corymbia* foram coletadas no minijardim clonal do Viveiro de Pesquisa do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Foram mensuradas a massa de matéria úmida e seca, a área foliar e calculada a área foliar específica (AFE), além de determinados os teores de macro e micronutrientes. Para os estudos 2 e 3, sete materiais genéticos de *Corymbia* spp. e o híbrido de *Eucalyptus* I-144 foram cultivados em vasos com solução nutritiva em casa de vegetação e câmara de crescimento no Departamento de Solos da UFV. No estudo 2, variáveis fisiológicas como taxa de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), transpiração (Tr), eficiência do uso da água (EUA), eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) e taxa de transporte de elétrons (ETR) foram mensuradas utilizando um analisador de gases (IRGA). Foram também avaliadas características morfológicas, incluindo altura, diâmetro do coleto, massa de matéria seca da parte aérea e da raiz, além do Índice de Qualidade de Dickson (IQD). No estudo 3, foram analisados os teores de P, K, Ca e Mg em folhas e raízes, e calculadas as eficiências de absorção, utilização e translocação desses nutrientes. Os resultados do estudo 1 revelaram ampla variabilidade entre os materiais genéticos quanto às eficiências no uso de carbono e nutrientes minerais, destacando o potencial para seleção de genótipos mais eficientes. No estudo 2, os clones K33 e SI0520 obtiveram os maiores valores de IQD, além de apresentarem as maiores taxas de A, gs e Tr, enquanto o clone 1017 registrou os menores valores para esses parâmetros. No estudo 3, as eficiências nutricionais variaram conforme o material genético e o nutriente avaliado, permitindo a seleção de genótipos adaptados a

diferentes níveis de disponibilidade de nutrientes no solo. Os resultados obtidos nos três estudos evidenciam a importância da avaliação integrada de parâmetros morfológicos, fisiológicos e nutricionais para a seleção de materiais genéticos de *Corymbia* spp. com maior eficiência no uso de carbono e nutrientes minerais. No estudo 1, a ampla variabilidade observada nas eficiências de uso de carbono e nutrientes entre os materiais genéticos indica o potencial de identificação de genótipos superiores, especialmente para sistemas de produção em solos com limitações nutricionais. No estudo 2, clones com maiores valores de IQD, também apresentaram as maiores taxas fotossintéticas e de trocas gasosas (A , g_s e Tr), o que reflete sua maior capacidade de produção de biomassa e qualidade de muda. Já no estudo 3, a variação das eficiências de absorção, utilização e translocação de macronutrientes entre os clones reforça a necessidade de considerar características nutricionais específicas para otimizar o manejo e o desempenho em diferentes condições de fertilidade do solo. De maneira geral, os resultados deste trabalho fornecem subsídios importantes para programas de melhoramento genético, permitindo a seleção de clones de *Corymbia* spp. mais eficientes e adaptados a cenários variados de disponibilidade de recursos.

Palavras-chave: corymbia-nutrição; corymbia-genótipos; corymbia-fisiologia.

ABSTRACT

ALMEIDA, Iale de Castro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2024. **NUTRITIONAL EFFICIENCY AND GAS EXCHANGE IN YOUNG PLANTS OF *Corymbia* spp.**. Adviser: Julio Cesar Lima Neves. Co-adviser: Gleison Augusto dos Santos.

The efficiency of carbon and mineral nutrient use in species of the genus *Corymbia* is essential to support breeding programs and guide nutritional management, although it is still underexplored in the literature. This study encompasses three distinct objectives: (1) to evaluate the efficiency of carbon and mineral nutrient utilization for leaf area production in genetic materials of *Corymbia* spp. in a clonal mini-garden; (2) to analyze morphological and physiological parameters of seedlings from *Corymbia* spp. clones; and (3) to investigate the efficiencies of nutrient absorption, utilization, and translocation in seedlings. In Study 1, leaves from 53 genetic materials of *Corymbia* were collected in the clonal mini-garden of the Research Nursery of the Department of Forest Engineering at the Federal University of Viçosa (UFV). Fresh and dry matter masses, leaf area, and specific leaf area (SLA) were measured, along with the determination of macro- and micronutrient contents. For Studies 2 and 3, seven genetic materials of *Corymbia* spp. and the *Eucalyptus* hybrid I-144 were cultivated in pots with nutrient solution in a greenhouse and growth chamber at the Department of Soils at UFV. In Study 2, physiological variables such as net photosynthetic rate (A), stomatal conductance (g_s), transpiration (T_r), water use efficiency (WUE), intrinsic water use efficiency (IWUE), and electron transport rate (ETR) were measured using a gas analyzer (IRGA). Morphological characteristics, including height, stem diameter, and dry matter mass of the shoot and root, as well as the Dickson Quality Index (DQI), were also evaluated. In Study 3, the contents of P, K, Ca, and Mg in leaves and roots were analyzed, and the efficiencies of absorption, utilization, and translocation of these nutrients were calculated. The results of Study 1 revealed a wide variability in carbon and nutrient use efficiencies among the genetic materials, highlighting the potential for selecting more efficient genotypes. In Study 2, clones K33 and SI0520 achieved the highest DQI values, as well as the highest rates of A , g_s , and T_r , while clone 1017 recorded the lowest values for these parameters. In Study 3, nutritional efficiencies varied according to the genetic material and the nutrient evaluated, enabling the selection of genotypes adapted to different levels of soil nutrient availability. The results obtained from the three studies underscore the importance of an integrated evaluation of morphological, physiological, and nutritional

parameters for the selection of *Corymbia* spp. genetic materials with greater efficiency in carbon and nutrient use. In Study 1, the wide variability observed in carbon and nutrient use efficiencies among genetic materials indicates the potential for identifying superior genotypes, particularly for production systems in nutrient-limited soils. In Study 2, clones with higher DQI values also exhibited higher photosynthetic rates and gas exchange (A , g_s , and Tr), reflecting their greater biomass production capacity and seedling quality. In Study 3, the variation in nutrient absorption, utilization, and translocation efficiencies among clones reinforces the need to consider specific nutritional traits to optimize management and performance under different soil fertility conditions. Overall, the results of this study provide valuable insights for breeding programs, enabling the selection of *Corymbia* spp. clones that are more efficient and adapted to various resource availability scenarios.

Keywords: keywords: corymbia-nutrition; corymbia-genotypes; corymbia-physiology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (N ou P (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).47
- Figura 2 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (K ou Ca (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).48
- Figura 3 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Mg ou S (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).49
- Figura 4 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Cu ou Zn (eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).50
- Figura 5 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Fe ou Mn (eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).51
- Figura 6 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar de B ((eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).52
- Figura 7 - Taxa de fotossíntese líquida (*A*) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).68

Figura 8 - Condutância Estomática (gs) para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).	69
Figura 9 - Taxa Transpiratória (Tr) para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).	70
Figura 10 - Eficiência de Uso de Água (EUA) para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).	71
Figura 11 - Eficiência Intrínseca de Uso de Água (EIUA) para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).	71
Figura 12 - Taxa Aparente de Transporte de Elétrons (ETR) para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).	72
Figura 13 - Relação entre eficiência de absorção (EA) (mg g^{-1}) e eficiência de utilização (EU) em ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$) integrada para P, K, Ca e Mg para materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas.	79
Figura 14 - Dispersão das variáveis nos componentes principais (CP1) e (CP2) - A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD - da análise multivariada em mudas de materiais de <i>Corymbia</i> e de <i>Eucalyptus</i> (I-144).	84
Figura 15 - Dispersão dos materiais genéticos de <i>Corymbia</i> e em <i>Eucalyptus</i> (I-144) nos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada- A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD - da análise multivariada.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Solução nutritiva usada em minijardim clonal.	26
Tabela 2 - Solução nutritiva de Clark adaptada por Locatelli <i>et al.</i> (1984).	31
Tabela 3 - Solução nutritiva de Clark adaptada por Locatelli <i>et al.</i> (1984).	35
Tabela 4 - Estatísticas descritivas para Área Foliar Específica (AFE), teores foliares de nutrientes, média geométrica da composição nutricional $g(X)$ e variáveis multinutrientes (zN, ZP, \dots, zB) da população de materiais genéticos (53) de <i>Corymbia</i> estudados na fase de minicepas.	45
Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson entre a Área Foliar Específica (AFE) e variáveis da composição nutricional foliar de 53 materiais genéticos de <i>Corymbia</i> , na fase de minicepas.	45
Tabela 6 - Quadrante de alocação dos materiais genéticos de <i>Corymbia</i> , na fase de minicepa, com base no relacionamento entre a área foliar específica e o teor foliar de cada nutriente.	55
Tabela 7 - Frequência Absoluta e Relativa de materiais genéticos alocados em cada quadrante do relacionamento entre área foliar específica (AFE) e o teor foliar de cada nutriente.	56
Tabela 8 - Matriz de Correlação entre a alocação nos quadrantes do relacionamento da AFE com o teor de cada nutriente.	56
Tabela 9 - Frequência de alocação nos quadrantes do relacionamento entre a AFE e o teor foliar de nutrientes para os materiais genéticos de <i>Corymbia</i> estudados.	58
Tabela 10 - Estatísticas descritivas para o índice de alocação dos materiais genéticos de <i>Corymbia</i> no quadrante de alta eficiência de uso de nutrientes minerais, conforme o grupo de eficiência de uso de carbono.	59
Tabela 11 - Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (“loadings”) e contribuições relativas da área foliar específica e dos teores de	

nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para toda a população de 53 materiais genéticos estudados.....	60
Tabela 12 – Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (“loadings”) e contribuições relativas dos teores de nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para o grupo de 21 materiais genéticos com alta eficiência no uso de carbono.	62
Tabela 13 - Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (“loadings”) e contribuições relativas dos teores de nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para o grupo de 32 materiais genéticos com baixa eficiência no uso de carbono.	63
Tabela 14 - Dados morfológicos e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144), na fase de mudas...64	64
Tabela 15 - Teores de P, K, Ca e Mg na parte aérea para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> na fase de mudas.	74
Tabela 16 - Teores de P, K, Ca e Mg nas raízes para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> na fase de mudas.....	75
Tabela 17 - Eficiência de absorção para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e na fase de mudas.....	76
Tabela 18 - Eficiência de utilização para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144) na fase de mudas.....	76
Tabela 19 - Eficiência de translocação para os materiais genéticos clonais de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144) na fase de mudas.....	78
Tabela 20 - Coeficientes de Carga, AutoValores e Variância Explicada dos Componentes Principais da Análise Multivariada, para CP1, CP2 e CP3 para as variáveis A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD.	81
Tabela 21 – Grupo de variáveis e componentes principais e suas devidas contribuições ao modelo multivariado.	82

Tabela 22 - Contribuição dos materiais genéticos de <i>Corymbia</i> e <i>Eucalyptus</i> (I-144) para CP1, CP2, CP3 e modelo multivariado.	83
Tabela 23 - Autovalores da matriz de correlação e estatísticas relacionadas para as 7 componentes principais.....	83

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 MATERIAL E MÉTODO	25
2.1 Estudo 1 – Eficiência Foliar Quanto ao Uso de Recursos em Minicepas de Materiais Genéticos de <i>Corymbia</i>	25
2.1.1 Caracterização Geral	25
2.1.2 Minijardim Clonal.....	25
2.1.3 Coleta e Análise de Material Vegetal	26
2.1.4 Obtenção das Variáveis Indicativas do Grau de Equilíbrio Entre os Nutrientes.....	27
2.1.5 Estatísticas Descritivas e Relacionamentos Univariados e Multivariados	28
2.2 Estudo 2 – Parâmetros Morfológicos e Fisiológicos de Clones Comerciais de <i>Corymbia</i> spp. na Fase de Mudanças	30
2.2.1 Caracterização da Área Experimental.....	30
2.2.2 Instalação e Condução do Experimento.....	30
2.2.3 Variáveis Morfológicas	31
2.2.4 Variáveis Fisiológicas.....	32
2.3 Estudo 3 – Eficiência Nutricional de Clones Comerciais de <i>Corymbia</i> spp. na fase de mudas.....	34
2.3.1 Caracterização da Área Experimental.....	34
2.3.2 Instalação e Condução do Experimento.....	34
2.3.3 Eficiência Nutricional	35
2.3.4 Análise de Dados	36

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.1 Estudo 1 – Eficiência Foliar Quanto ao Uso de Recursos em Minicepas de Materiais Genéticos de <i>Corymbia</i>	38
3.1.1 Área Foliar Específica	38
3.1.2 Composição nutricional foliar	41
3.1.2.1 Grau de Balanço de Massa (teores) para Macronutrientes	41
3.1.2.2 Grau de Balanço de Massa (teores) para Micronutrientes	42
3.1.3 Grau de Equilíbrio (Variáveis Multinutrientes z)	42
3.1.4 Grau de Balanço Nutricional Conjunto da Composição Nutricional (g(x))	43
3.1.5 Correlações entre Área Foliar Específica e Status Nutricional em Plantas	43
3.1.5.1 Correlações com Macronutrientes.....	43
3.1.5.2 Correlações com Micronutrientes	44
3.1.5.3 Correlação com o Grau de Balanço Nutricional Global	44
3.1.5.4 Correlação com o Grau de Equilíbrio da Composição Nutricional Foliar	44
3.1.6 Alocação dos materiais genéticos em gráficos de quadrantes.....	46
3.1.7 Relacionamentos Multivariados Entre a AFE e a Composição Nutricional Foliar.....	59
3.1.7.1 Grupo de Materiais Genéticos.....	59
3.1.7.2 Materiais Genéticos com Alta Eficiência de Uso de Carbono.....	60
3.1.7.3 Materiais Genéticos com Baixa Eficiência de Uso de Carbono.....	62
3.1.7.4 Comparações Entre Grupos.....	63
3.2 Estudo 2 – Parâmetros Morfológicos e Fisiológicos de Clones Comerciais de <i>Corymbia</i> spp. na Fase de Mudas	64

3.2.1 Análises Morfológicas.....	64
3.2.2 Análises Fisiológicas	67
3.2.2.1 Fotossíntese Líquida (A)	67
3.2.2.2 Condutância Estomática (gs)	68
3.2.2.3 Transpiração (Tr).....	69
3.2.2.4 Eficiência do Uso da Água (EUA).....	70
3.2.2.5 Taxa Aparente de Transporte de Elétrons (ETR)	72
3.3 Estudo 3 – Eficiência Nutricional de Clones Comerciais de <i>Corymbia</i> spp. na Fase de Mudas	74
3.3.1 Teores de P, K, Ca e Mg na Parte Aérea e nas Raízes	74
3.3.2 Eficiência de Absorção (EA).....	75
3.3.3 Eficiência de Utilização (EU)	76
3.3.4 Eficiência de Translocação (ET).....	77
3.3.5 Integração entre Eficiência de Absorção e de Utilização.....	78
3.3.6 Considerações Sobre a Eficiência Nutricional de Clones de <i>Corymbia</i> ..	79
3.3.7 Relações entre Variáveis Morfológicas, Fisiológicas e Nutricionais	80
3.7.1.1 Discussão e Síntese Conclusiva	85
3.7.1.1.1 Contribuições das Variáveis no Modelo Multivariado	85
3.7.1.1.2 Contribuições dos Grupos de Variáveis	86
3.7.1.1.3 Contribuição dos Clones	86
3.7.1.1.4 Dispersão nos Componentes Principais.....	87
3.7.1.1.5 Síntese Conclusiva.....	87

4 CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal no Brasil tem diversas potencialidades de crescimento, que abrangem os aspectos ambientais e sociais. Em complemento, há disponibilidade de tecnologias capazes de otimizar as atividades e maximizar a produção, sobretudo, em povoamentos florestais (RABELO, *et al.*, 2020). Nesse contexto, o gênero *Corymbia* K. D. Hill & L.A.S. Johnson tem se destacado, tendo sido adicionado à família Myrtaceae por meio de proposta de botânicos (HILL & JOHNSON, 1995; DICKINSON *et al.*, 2012).

O gênero *Corymbia* tem surgido como opção para plantio devido a qualidade de seus subprodutos e variedade de uso, como a produção de carvão vegetal, celulose e produtos não madeireiros, como óleos essenciais (SILVA *et al.*, 2012). Ademais, as espécies do gênero apresentam fácil adaptação a condições adversas e crescimento rápido, relacionado à alta densidade da madeira (REIS *et al.*, 2013; ASSIS, *et al.*, 2021).

Tem-se que espécies deste gênero apresentam maior tolerância ao estresse hídrico e ao calor, além de resistência fisiológica a pragas e a doenças, se comparado ao gênero *Eucalyptus*. No que diz respeito às características da árvore, tem-se copa mais densa e fechamento de dossel rápido, além de maior resistência aos ventos (DIANESE *et al.*, 1986; BRAUNER *et al.*, 2011; ASSIS, 2014). Em relação à qualidade da madeira, espécies do gênero *Corymbia* apresentam densidade básica superior, boa resistência à torção e ao cisalhamento e boa trabalhabilidade do material (LEE, 2007; MORAIS *et al.*, 2010; XIE *et al.*, 2024).

Em contrapartida, essas espécies, durante o crescimento, podem formar bolsas de resina na madeira, devido a reatividade a eventos externos, capazes de diminuir a qualidade da madeira e influenciar seu uso. Ainda em relação à produção madeireira, quando comparada à de *Eucalyptus*, há maior proporção de casca (ASSIS, 2014).

Outro ponto negativo relacionado ao gênero, é a dificuldade de enraizamento de materiais genéticos, que ocasiona um desafio à produção de mudas, devido a sua baixa efetividade (REIS *et al.*, 2013; ASSIS, 2014). Raízes inferiores acarretam baixa quantidade e qualidade das mudas, características importantes para estabilidade e

sobrevivência em campo. Além de outras particularidades como adaptação a adversidades e resistência a condições bióticas e abióticas, tem se buscado materiais genéticos com alto índice de enraizamento, para maior eficiência de produção (REIS *et al.*, 2013).

O processo de produção de mudas de boa qualidade e com alta porcentagem de enraizamento é iniciado pela condução adequada do minijardim clonal. Para isso, o manejo nutricional efetivo do minijardim clonal é fundamental, por se relacionar ao menor intervalo de coleta de miniestaca, o qual possibilita o aumento da produtividade por minicepa (WENDLING *et al.*, 2005). Assim, o ganho do rendimento de miniestacas em minijardins clonais, está interligado ao ajuste da fertirrigação para cada material genético, uma vez que há diferentes especificidades e demandas nutricionais distintas por clone. Soluções nutritivas semelhantes para diferentes clones podem acarretar desbalanceamento, seja por deficiência ou excesso de nutrientes, e desequilíbrios nutricionais, diminuindo a produtividade do minijardim (CUNHA *et al.*, 2009).

Além de técnicas para enraizamento de miniestacas, tem-se que, no Brasil, o manejo silvicultural e o melhoramento genético foram capazes de triplicar a produtividade de florestas plantadas nas últimas cinco décadas. No entanto, assim como na produção de mudas, a adequação do estado nutricional dessas plantas é um desafio, uma vez que há grande variação de clima, solo e nível tecnológico nos sítios de plantio. Uma opção para diagnóstico e proposição de esquemas adequados de manejo nutricional, além da análise de solo, é a utilização da diagnose foliar. Vale ressaltar que, a análise foliar é um instrumento valioso visando a acurácia da nutrição de minijardins clonais (BELLOTE & SILVA, 2000; SOARES *et al.*, 2021).

A diagnose foliar tem sido um importante instrumento de monitoramento e diagnóstico da nutrição de plantas, além de possibilitar o alcance do grau de balanço e do equilíbrio nutricional adequados. Em acréscimo, há relação entre os teores de nutrientes na folha e o crescimento vegetal. Assim, a análise de material vegetal, em conjunto com a análise de solo, reflete a interação dos fatores solo-planta, e otimiza diagnósticos nutricionais e recomendações de fertilização.

Em complemento, a adequação nutricional é capaz de promover melhorias no crescimento e desenvolvimento das plantas desde estágios iniciais até a colheita.

Desse modo, uma nutrição ajustada à produção de mudas acarreta indivíduos de maior qualidade, ou seja, com capacidade de sobrevivência e desenvolvimento satisfatório em campo (CARNEIRO, 1995; PORTELA, *et al.*, 2001).

A otimização nutricional pode ser alcançada com base na eficiência das plantas em relação aos nutrientes minerais, que engloba sua absorção, translocação e acúmulo, e à utilização do nutriente visando o produto de interesse (POZZA, *et al.*, 2009). A consideração da eficiência do uso dos nutrientes pode resultar na seleção de materiais genéticos capazes de alcançar maiores produções com menor requerimento de nutrientes (VITOUSEK, 1982).

A eficiência nutricional está relacionada à capacidade das plantas em absorver nutrientes do substrato, utilizá-los e realizar sua translocação no interior do vegetal (KHOSHGOFTARMANESH *et al.*, 2010; SADEGHZADEH, 2013). Ao comparar os gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus*, nota-se diferenças de exigência nutricional e de eficiência nutricional. No entanto, plantas de ambos esses gêneros têm baixo consumo de nutrientes, sendo eficientes quanto à absorção e utilização (SCOLFORO, 2008).

Nesse contexto, a eficiência de utilização do nutriente pode ser definida como a razão entre a quantidade de matéria seca produzida e a do nutriente nela contida (HANSEN e BAKER, 1979; FAGERIA, 1998). Já a eficiência de translocação pode ser obtida por meio da razão entre o conteúdo do nutriente na parte aérea e o seu conteúdo em toda a planta (ROZANE *et al.*, 2007, LI *et al.*, 1991).

Com base nesses parâmetros, é possível a escolha de materiais genéticos mais eficientes nutricionalmente (CALDEIRA *et al.*, 2004). Tal método é capaz de selecionar clones produtivos, com menor requerimento de nutrientes minerais ou com sua conversão em biomassa de maneira mais eficiente (GRAHAM, 1984). Cabe mencionar que, há carência de dados sobre tais parâmetros para materiais genéticos do gênero *Corymbia* desde a fase de minijardim e viveiro.

Outro importante fator no desenvolvimento de plantas é a fisiologia vegetal, que influencia o crescimento vegetal e resulta em produção florestal, uma vez que, com base na disponibilidade de recursos naturais, a sua absorção pela planta, tem-se sua

eficiência em realizar a fotossíntese (BINKLEY *et al.*, 2004). Em complemento, a área foliar e a área foliar específica (AFE) são variáveis diretamente relacionadas à produção fotossintética e respiração foliar, e conseqüentemente, à conversão em carboidratos, lipídios e proteínas, o que influencia o crescimento da planta (INOUE & RIBEIRO, 1988; PEIXOTO & PEIXOTO, 2009).

Desse modo, além da importância de características nutricionais, parâmetros fisiológicos podem ser determinantes ao aumento da produtividade vegetal (BRANDÃO FILHO, *et al.*, 2003). Tem-se ainda, que fotossíntese, condutância estomática e transpiração variam de acordo com o material genético e as condições locais onde está a planta (INOUE & RIBEIRO, 1988; RYAN *et al.*, 2010; FERNANDES, *et al.*, 2015).

Ainda sobre parâmetros fisiológicos, a diminuição da disponibilidade de água no solo promove maior controle da transpiração, que altera a condutância estomática, acarretando menor crescimento de árvores, devido a taxas fotossintéticas inferiores em árvores, como as de eucalipto (LARCHER, 2004; OTTO *et al.*, 2013; TATAGIBA, *et al.*, 2015). Assim, a eficiência do uso da água torna-se um fator limitante ao crescimento vegetal, sobretudo em cenários de déficit hídrico (STAPE *et al.*, 2004).

No que diz respeito à AFE, tem-se que é uma variável fisiológica que permite caracterizar a eficiência do uso de carbono pelas plantas. Representada pela razão entre a área foliar e a biomassa seca correspondente, a AFE reflete a alocação de carbono na estrutura da folha e sua funcionalidade fotossintética (WRIGHT *et al.*, 2004). Folhas com alta AFE tendem a apresentar maior capacidade fotossintética por unidade de biomassa, sendo característica de espécies que priorizam a captura eficiente de luz e otimização do crescimento (POORTER *et al.*, 2009). Em contrapartida, valores reduzidos de AFE podem estar associados a folhas estruturalmente mais robustas, que apresentam maior resistência à herbivoria e condições adversas (SHIPLEY *et al.*, 2006).

Dada a escassez de informações detalhadas sobre a AFE e os graus de balanço e equilíbrio nutricional em *Corymbia*, torna-se fundamental aprofundar os estudos nessas áreas. Compreender a AFE em *Corymbia* é essencial, pois essa métrica influencia diretamente a eficiência fotossintética e a alocação de biomassa, a

qual o crescimento e a adaptação das plantas a diferentes condições ambientais. Além disso, investigar o grau de balanço nutricional (teores de nutrientes) e o grau de equilíbrio nutricional (relações entre os nutrientes) nas folhas de *Corymbia* pode fornecer *insights* para otimizar práticas de manejo florestal, melhorar a produtividade e garantir a sustentabilidade dos plantios.

Ao se relacionar todos os fatores supracitados referentes à morfologia, fisiologia e nutrição, tem-se que a junção desses fatores pode sugerir meios para escolha de materiais genéticos eficientes (BORÉM *et al.*, 2021). Caso essa seleção seja realizada na fase inicial de crescimento, pode haver diminuição de tempo no processo do melhoramento genético, de modo a otimizar essa etapa (MANFIO *et al.*, 2003).

Isto posto, fica clara a importância de estudos acerca da nutrição e da fisiologia de espécies florestais usadas comercialmente. No entanto, esses estudos são escassos para o gênero *Corymbia*, assim como estudos que abordam nutrição de minicepas em minijardim clonal deste gênero (SANTANA *et al.*, 2002; LIMA *et al.*, 2005; SANTANA *et al.*, 2008; PINTO *et al.*, 2011; FERNANDES *et al.*, 2016; PINTO *et al.*, 2021).

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo geral avaliar e sugerir critérios para seleção de materiais genéticos do gênero *Corymbia*, com relação a parâmetros morfológicos, fisiológicos e nutricionais; como objetivos específicos, tem-se:

- i. Mensurar área foliar específica (AFE) de materiais genéticos de *Corymbia* em minijardim clonal;
- ii. Avaliar a eficiência de uso do carbono para produção de área foliar para materiais genéticos de *Corymbia* em minijardim clonal;
- iii. Avaliar a composição mineral da folha, indicativa da eficiência de utilização de nutrientes para a produção de folhas, de materiais genéticos de *Corymbia* em minijardim clonal;
- iv. Avaliar dados morfológicos de materiais genéticos de *Corymbia* spp. na fase de mudas;

- v. Avaliar fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração, eficiência do uso da água e taxa aparente de transporte de elétrons para plantas de *Corymbia* spp. na fase de mudas;
- vi. Avaliar os teores de nutrientes minerais na parte aérea e raízes de plantas de *Corymbia* spp. na fase de mudas;
- vii. Obter eficiências de absorção, utilização e translocação de plantas de *Corymbia* spp. na fase de mudas;
- viii. Contribuir para a seleção de materiais genéticos de *Corymbia* spp. mais eficientes, em relação à nutrição.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Estudo 1 – Eficiência Foliar Quanto ao Uso de Recursos em Minicepas de Materiais Genéticos de *Corymbia*

2.1.1 Caracterização Geral

O Viveiro de Pesquisa do Departamento de Engenharia Florestal, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, conta com canaletões com minicepas de materiais genéticos do gênero *Corymbia*. O local tem como coordenadas geográficas 20°45'45" S de latitude e 42°52'04" W de longitude, sendo localizado a 690 m de altitude. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é temperado quente-mesotérmico (Cwa), com verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual é de 1.274 mm, com temperaturas médias de 21,9°C (UFV, 2016).

2.1.2 Minijardim Clonal

O minijardim usado para retirada das folhas para análise está estabelecido em cinco canaletões de cimento (0,30 metro de profundidade e 0,90 metro de largura, e dispostos à altura de 1,2 metro da superfície do piso), preenchido com areia lavada, cada um com 96 materiais genéticos, totalizando 480 minicepas usadas em testes clonais. O sistema é assim sistema semi-hidropônico, sendo que o fornecimento de nutrientes e de água se dá por gotejamento automatizado em um sistema semi-hidropônico.

Durante o estabelecimento do minijardim fez-se uso de três soluções para fertirrigação, listadas na Tabela 1. A solução nutritiva tem condutividade elétrica de 1,4 mS cm⁻¹ e pH 6,20, ambos esses parâmetros mensurados diariamente e ajustados, quando necessário.

Tabela 1 - Solução nutritiva usada em minijardim clonal.

Solução 1	Solução Preparada				
	Concentração (g L ⁻¹)	Solução 2	Concentração (g L ⁻¹)	Solução 3	Concentração (g L ⁻¹)
Ca(NO ₃) ₂	0,920	MgSO ₄	0,307	H ₃ BO ₃	2,80 x 10 ⁻⁴
KNO ₃	0,200	FeEDTA	0,040	Na ₂ MoO ₄	4,00 x 10 ⁻⁵
NH ₄ H ₂ PO ₄	0,096			ZnSO ₄	4,80 x 10 ⁻⁴
KCl	0,240			CuSO ₄	1,00 x 10 ⁻⁴
				MnSO ₄	1,12 x 10 ⁻³

2.1.3 Coleta e Análise de Material Vegetal

As minicepas do minijardim clonal foram classificadas em relação à quantidade de minicepas estabelecidas e qualidade para produção de miniestacas. Para o segundo critério, qualitativo, foram atribuídas notas de 1 a 3 para minicepas, sendo: nota 1 - para minicepas com pequena capacidade de coleta de miniestacas, no tamanho padrão (10-20 cm); nota 2 - minicepas com média capacidade de coleta de miniestacas, no tamanho padrão; nota 3 - minicepas com grande capacidade de coleta de miniestacas, no tamanho padrão. Em acréscimo, a classificação foi qualitativa e se buscou representar os materiais genéticos de acordo com sua distribuição no canaletão e a nota obtida.

Após a classificação, foram selecionados 53 materiais genéticos que contemplavam igualmente todas as classes, eram representativos e estavam distribuídos nos cinco canaletões em todo o seu comprimento. A coleta das folhas se deu três dias frescos e nas primeiras horas da manhã, para manutenção do turgor foliar.

Para realização de análises morfológicas, foram coletadas folhas completamente expandidas, na região central das minicepas. Inicialmente se contou o número de folhas, em seguida, a massa de matéria fresca da folha foi obtida em balança digital com precisão de 0,01 g.

Além das variáveis anteriormente citadas, também se mensurou a área foliar (AF) imediatamente após a coleta, de modo, a evitar murcha. Para isso, foi utilizado o Li-3100C, Licor Biosciences. Em seguida, as folhas foram submetidas

à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até peso constante e, posteriormente, moídas para análise química.

A área foliar específica (AFE), que, em essência reflete a eficiência de utilização do Carbono (C) para produção de superfície fotossintetizante, foi obtida pela relação entre a área foliar total e a massa de matéria seca correspondente, conforme a equação 1:

$$AFE = \frac{\text{área foliar (m}^2\text{)}}{\text{massa foliar (kg)}} \quad \text{Equação 1}$$

Nas amostras do material vegetal seco e moído foi feita a determinação de macronutrientes e de micronutrientes, no Laboratório de Rotina de Análise de Tecido do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Os teores foliares de nitrogênio (N) foram determinados pelo método de Kjeldahl, enquanto os teores dos demais macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S) e de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B) foram quantificados por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

2.1.4 Obtenção das Variáveis Indicativas do Grau de Equilíbrio Entre os Nutrientes

Com base nos teores de nutrientes, utilizou-se o método CND (Compositional Nutrient Diagnosis, CND), proposto por Parent e Dafir (1992), de modo a obter a variável $g(x)$ e as variáveis multinutrientes ($z_N, z_P, z_K, \dots, z_B$) indicativas do grau de equilíbrio nutricional entre os nutrientes nas folhas, calculadas a partir das equações 2 e 3.

$$g(x) = \frac{N \times P \times K \times Ca \times Mg \times S \times Cu \times Fe \times Zn \times Mn \times B \times R}{D} \quad \text{Equação 2}$$

$$z_i = \log [(x_i / g(x))] \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$g(x)$ = Média geométrica da composição nutricional;

N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn, B = Teores dos respectivos nutrientes (todos em g kg⁻¹);

R = Valor do complemento para 1000 g kg⁻¹ de matéria seca em relação à soma de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B;

D= Número dos nutrientes envolvidos na diagnose, incluindo o complemento (R);

zi= Variável multinutriente;

xi= Teor do nutriente para o qual se calcula a variável multinutriente.

2.1.5 Estatísticas Descritivas e Relacionamentos Univariados e Multivariados

Considerando toda a população de materiais genéticos estudados (53), foram obtidas as estatísticas descritivas média, desvio-padrão e a distribuição em classes de percentil para a AFE e o teor foliar de cada nutriente (Tnut). Além dessas, foram obtidos os coeficientes de correlação de Pearson entre a AFE e o Tnut, bem como entre a AFE e $g(x)$ e entre AFE e as variáveis multinutrientes, para avaliar o relacionamento entre a eficiência de uso de carbono e a eficiência de uso de nutrientes minerais. As correlações foram classificadas como significativas ($p < 0,05$), tendências ($0,05 \leq p < 0,20$) e não significativas ($p \geq 0,20$), seguindo metodologia similar à proposta por Chen *et al.* (2023).

Foram elaborados gráficos de dispersão em quadrantes sendo neles alocados os 53 materiais genéticos, com base na relação entre AFE, plotada no eixo horizontal, e o teor de cada nutriente, plotado no eixo vertical, considerando as médias respectivas para definir os quatro quadrantes:

- Quadrante 1 - materiais genéticos com AFE maior que a média respectiva e teor do nutriente maior que a média respectiva, correspondendo à alta eficiência de uso de carbono e baixa eficiência de uso do nutriente mineral;
- Quadrante 2 - materiais genéticos com AFE menor que a média respectiva e teor do nutriente maior que a média respectiva, correspondendo à baixa eficiência de uso do carbono e do nutriente mineral;
- Quadrante 3 - materiais genéticos com AFE menor que a média respectiva e teor do nutriente menor ou igual à média respectiva, correspondendo à baixa eficiência de uso do carbono e alta eficiência de uso do nutriente mineral;

- Quadrante 4 - materiais genéticos com AFE maior que a média respectiva e teor do nutriente menor ou igual à média respectiva, correspondendo à alta eficiência de uso do carbono e do nutriente mineral.

Diante disso, elaborou-se tabela contendo a frequência absoluta e relativa (%) de materiais genéticos alocados em cada quadrante, para o relacionamento da AFE com o teor de cada nutriente.

Realizou-se, também, a análise multivariada por componentes principais (ACP) considerando os dados de AFE, de teores de nutrientes, de $g(x)$ e das variáveis multinutrientes (z_i) para avaliar a estrutura da composição nutricional da folha e derivar padrões, considerando: a) toda a população de materiais genéticos (53); b) os materiais genéticos alocados nos quadrantes 1 e 4; c) apenas os materiais genéticos alocados no quadrante 4.

Fez-se análise da correlação não paramétrica, método de Spearman, entre os quadrantes de alocação dos 53 materiais genéticos em relação aos nutrientes minerais.

Realizou-se, também, a análise multivariada por componentes principais (ACP) considerando os dados de AFE, de teores de nutrientes, e das variáveis multinutrientes (z_i) para avaliar a estrutura da composição nutricional da folha e derivar padrões, considerando: a) toda a população de materiais genéticos (53); b) os materiais genéticos alocados nos quadrantes 1 e 4, ou seja, aqueles com alta eficiência no uso de carbono; c) os materiais alocados nos quadrantes 2 e 3, com baixa eficiência no uso de carbono.

2.2 Estudo 2 – Parâmetros Morfológicos e Fisiológicos de Clones Comerciais de *Corymbia* spp. na Fase de Mudanças

2.2.1 Caracterização da Área Experimental

A condução do experimento se deu em câmara de crescimento, pertencente ao Departamento de Solos, localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

O experimento contou com 7 materiais genéticos de híbridos do gênero *Corymbia*, sendo todos *C. torelliana* x *C. citriodora* (K33, SI0520, 1013, 1014, 1016, 1017, 1018) plantados para uso comercial em diversas regiões do Brasil. Além desses, o híbrido I-144 do gênero *Eucalyptus*, oriundo do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, foi avaliado para controle devido seu amplo uso em plantios comerciais. Cabe mencionar que, estes clones estavam dispostos em delineamento inteiramente casualizado. Vale ressaltar que, os materiais genéticos desse estudo não têm correlação com o estudo 1.

2.2.2 Instalação e Condução do Experimento

As mudas foram produzidas a partir de miniestacas oriundas do minijardim clonal do Viveiro de Pesquisas Florestais da Universidade Federal de Viçosa. As miniestacas com altura entre 10 e 20 cm foram colocadas em tubetes plásticos, contendo substrato comercial *Carolina Soil*, com adição de osmocote, para suprimento de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) e superfosfato simples, para fornecimento principalmente de P. As caixas com tubetes foram levadas à casa de vegetação por 35 dias para enraizamento em casa de vegetação, em seguida, em casa de sombra por 7 dias para aclimação. Após esse período, foram selecionadas as mudas de maior qualidade radicular e de parte aérea para serem levadas à câmara de crescimento.

A partir da seleção de mudas, cada indivíduo teve o substrato retirado e a sua colocação em vaso plástico com apoio de uma placa de isopor. O vaso continha 1,3 L de solução nutritiva (CLARK, 1975) e adaptada por LOCATELLI *et al.* (1984) aerada (Tabela 2). Esses vasos eram pintados em seu exterior da

cor prata para reflexão da luz e calor e em seu interior possuíam sacos plásticos, de modo a evitar a contaminação ou acúmulo de sais (NOVAIS *et al.*, 1991).

Tabela 2 - Solução nutritiva de Clark adaptada por Locatelli *et al.* (1984).

Composto químico	Concentração
CaCl ₂ 2H ₂ O	1,30 mM
MgSO ₄ 7H ₂ O	0,30 mM
KH ₂ PO ₄	0,069 mM
KCl	0,53 mM
K ₂ SO ₄	0,30 mM
NH ₄ NO ₃	2,925 mM
MnCl ₂ 4H ₂ O	7,00 µM
H ₃ BO ₃	19,00 µM
ZnSO ₄ 7H ₂ O	2,00 µM
Na ₂ MoO ₄	0,086 µM
CuSO ₄ 5H ₂ O	0,50 µM
FeEDTA	40,00 µM

No momento do transplante das mudas, a solução nutritiva presente possuía $\frac{1}{4}$ de força. Houve uma segunda troca da solução nutritiva em 5 dias para $\frac{1}{2}$ de força e em 10 dias, a solução presente nos vasos plásticos possuía 1 força, ou seja, a solução supracitada completa. O pH medido foi aferido diariamente, com o objetivo de ser mantido próximo a 6,0 ($\pm 0,5$) e a troca da solução foi realizada semanalmente, quando se mediu o diâmetro do coleto e altura das plantas. Se completava os vasos, quando necessário, com água deionizada.

As mudas em solução nutritiva estiveram na câmara de crescimento por 42 dias. Esta contou com umidade relativa média de 50%, temperatura de 27°C, aproximadamente, intensidade luminosa de 120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 12 horas, ajustados gradualmente para evitar estresse aos indivíduos vegetais presentes.

2.2.3 Variáveis Morfológicas

Após o crescimento e estabelecimento na câmara de crescimento, as plantas foram mensuradas quanto à altura da parte aérea, comprimento da raiz

e diâmetro do coleto, além de serem separadas em raízes e parte aérea. As raízes foram limpas com água deionizada e a umidade retirada com o auxílio de papel toalha durante 2 minutos, em seguida, sua massa fresca foi obtida com balança digital com precisão de 0,001 g. Além da massa da raiz, foram obtidas a massa da parte aérea, com a mesma balança supracitada.

Após esse processo, o material foi acondicionado em sacos de papel e transferido para estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65°C por 96 horas para obtenção de massa seca.

Em acréscimo, foi calculado o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON *et al.*, 1960), importante para avaliação da qualidade de mudas florestais, por relacionar parâmetros morfológicos e biomassa (Equação 4).

$$IQD = \frac{MST}{(H/DC) + (MSPA/MSR)} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

IQD= Índice de Qualidade de Dickson;

MST= Massa Seca Total (MSPA+MSR) (g);

H= Altura (cm);

DC= Diâmetro do Coleto (mm);

MSPA= Massa Seca da Parte Aérea (g);

MSR= Massa seca da Raiz (g).

Cabe ressaltar que, não foram usados métodos estatísticos para comparação dos parâmetros para os materiais genéticos devido à variação no número de indivíduos de cada clone, acarretado pela sua dificuldade de enraizamento e sobrevivência. Por se tratar de um estudo exploratório, se priorizou o quantitativo de exemplares genéticos.

2.2.4 Variáveis Fisiológicas

Ao final de 12 semanas, do desenvolvimento das plantas, incluindo o enraizamento e estabelecimento em câmara de crescimento, se coletou parâmetros fisiológicos como fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática

(gs), transpiração (Tr), eficiência do uso da água (EUA), a eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) e taxa aparente de transporte de elétrons (ETR).

Para medidas das trocas gasosas, como A, gs e Tr, foi utilizado um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA), modelo LI-6400XT (Licor, Nebraska, USA), onde a área analisada das folhas era de 2 cm², previamente definida durante a configuração do equipamento. Para o uso do IRGA, utilizou-se um sistema buffer, de modo a estabilizar a concentração de gás carbônico atmosférico. Com isso, quando inserida a folha na câmara do equipamento dotada de infravermelho, ocorre a medição a concentração de CO₂ interna e o cálculo dos parâmetros. A obtenção da EUA se deu através da equação 5, enquanto a EIUA, por meio da equação 6. Enquanto a ETR fotossintética foi calculada com a equação de SCHREIBER *et al.* (1994).

$$EUA = \frac{\text{fotossíntese líquida } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s})}{\text{transpiração } (\text{mmol}/\text{m}^2/\text{s})} \quad \text{Equação 5}$$

$$EIUA = \frac{\text{fotossíntese líquida } (\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s})}{\text{condutância estomática } (\text{umol}/\text{m}^2/\text{s})} \quad \text{Equação 6}$$

2.3 Estudo 3 – Eficiência Nutricional de Clones Comerciais de *Corymbia* spp. na fase de mudas

2.3.1 Caracterização da Área Experimental

A condução do experimento se deu em câmara de crescimento, pertencente ao Departamento de Solos, localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

O experimento contou com 7 materiais genéticos de híbridos do gênero *Corymbia*, sendo todos *C. torelliana* x *C. citriodora* (K33, SI0520, 1013, 1014, 1016, 1017, 1018) plantados para uso comercial em diversas regiões do Brasil. Além desses, o híbrido I-144 do gênero *Eucalyptus*, oriundo do híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*, foi avaliado para controle devido seu amplo uso em plantios comerciais. Cabe mencionar que, estes clones estavam dispostos em delineamento inteiramente casualizado. Vale ressaltar que, os materiais genéticos desse estudo não são os mesmos do estudo 1.

2.3.2 Instalação e Condução do Experimento

As mudas foram produzidas a partir de miniestacas oriundas do minijardim clonal do Viveiro de Pesquisas Florestais da Universidade Federal de Viçosa. As miniestacas com altura entre 10 e 20 cm foram colocadas em tubetes plásticos, contendo substrato comercial *Carolina Soil*, com adição de osmocote, para suprimento de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) e superfosfato simples, para fornecimento principalmente de P. As caixas com tubetes foram levadas à casa de vegetação por 35 dias para enraizamento em casa de vegetação, em seguida, em casa de sombra por 7 dias para aclimatação. Após esse período, foram selecionadas as mudas de maior qualidade radicular e de parte aérea para serem levadas à câmara de crescimento.

A partir da seleção de mudas, cada indivíduo teve o substrato retirado e a sua colocação em vaso plástico com apoio de uma placa de isopor. O vaso continha 1,3L de solução nutritiva (CLARK, 1975) e adaptada por LOCATELLI *et al.* (1984) aerada (Tabela 3). Esses vasos eram pintados em seu exterior da cor

prata para reflexão da luz e calor e em seu interior possuíam sacos plásticos, de modo a evitar a contaminação ou acúmulo de sais (NOVAIS *et al.*, 1991).

Tabela 3 - Solução nutritiva de Clark adaptada por Locatelli *et al.* (1984).

Composto químico	Concentração
CaCl ₂ 2H ₂ O	1,30 mM
MgSO ₄ 7H ₂ O	0,30 mM
KH ₂ PO ₄	0,069 mM
KCl	0,53 mM
K ₂ SO ₄	0,30 mM
NH ₄ NO ₃	2,925 mM
MnCl ₂ 4H ₂ O	7,00 µM
H ₃ BO ₃	19,00 µM
ZnSO ₄ 7H ₂ O	2,00 µM
Na ₂ MoO ₄	0,086 µM
CuSO ₄ 5H ₂ O	0,50 µM
FeEDTA	40,00 µM

No momento do transplante das mudas, a solução nutritiva presente possuía $\frac{1}{4}$ de força. Houve uma segunda troca da solução nutritiva em 5 dias para $\frac{1}{2}$ de força e em 10 dias, a solução presente nos vasos plásticos possuía 1 força, ou seja, a solução supracitada completa. O pH medido foi aferido diariamente, com o objetivo de ser mantido próximo a 6,0 ($\pm 0,5$) e a troca da solução foi realizada semanalmente, quando se mediu o diâmetro do coleto e altura das plantas. Se completava os vasos, quando necessário, com água deionizada.

As mudas em solução nutritiva estiveram na câmara de crescimento por 42 dias. Esta contou com umidade relativa média de 50%, temperatura de 27°C, aproximadamente, intensidade luminosa de 120 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e fotoperíodo de 12 horas, ajustados gradualmente para evitar estresse aos indivíduos vegetais presentes.

2.3.3 Eficiência Nutricional

Após a obtenção dos valores de massa seca de raízes e parte aérea, esses materiais foram triturados manualmente, digeridos em solução nítrico-

perclórica, filtrados, diluídos e colocados em tubos Falcon de 10 mL para armazenamento em geladeira. Os elementos de interesse, Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) foram analisados por espectrometria no ICP-OES optima 8300 DV PerkinElmer. Desse modo, foi possível a obtenção das variáveis relacionadas aos nutrientes minerais acumulados na parte aérea e nas raízes das mudas.

Após a obtenção da massa de matéria seca, como descrito anteriormente, se calculou o conteúdo de nutrientes através da multiplicação do teor de tais nutrientes e massa de matéria seca de cada compartimento.

Em acréscimo, foram calculadas as eficiências nutricionais, as quais incluem eficiência de absorção – EA (Equação 7) (SWIADER *et al.*, 1994), de utilização – EU (Equação 8) (SIDDIQUI & GLASS, 1981) e de translocação de nutrientes – ET (Equação 9) (LI *et al.*, 1991), através das equações descritas a seguir.

$$EA = \frac{\text{Conteúdo total do nutriente na planta (mg)}}{\text{Massa de matéria seca da raiz (g)}} \quad \text{Equação 7}$$

$$EU = \frac{(\text{Massa de matéria seca total})^2 (g)}{\text{Conteúdo total do nutriente na planta (g)}} \quad \text{Equação 8}$$

$$ET = \frac{\text{Conteúdo do nutriente na parte aérea (g)}}{\text{Conteúdo total do nutriente na planta (g)}} \quad \text{Equação 9}$$

2.3.4 Análise de Dados

Realizou-se análise multivariada, por componentes principais (CP), englobando, em conjunto, as seguintes variáveis: fotossíntese líquida (A), transpiração (TR), eficiência intrínseca do uso de água (EIUA), matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca das raízes (MSR), eficiência de absorção de fósforo (EAP), eficiência de absorção de potássio (EAK), eficiência de absorção de cálcio (EACa), eficiência de absorção de magnésio (EAMg), eficiência de utilização de fósforo (EUP), eficiência de utilização de potássio (EUK), eficiência de utilização de cálcio (EUCa), eficiência de utilização de magnésio (EUMg), eficiência de translocação de fósforo (ETP), eficiência de translocação de

potássio (ETK), eficiência de translocação de cálcio (ETCa), eficiência de translocação de magnésio (ETMg) e índice de qualidade de Dickson (IQD).

A seguir, foram obtidos os coeficientes de carga (*loadings*) das variáveis nos CP, sendo consideradas como significativas as variáveis com *loading* maior ou igual a 0,707. Foram obtidos gráficos de dispersão entre os dois primeiros componentes principais, tanto em nível das variáveis quanto em nível dos materiais genéticos. Foram também obtidas as contribuições relativas (em %) das variáveis e dos materiais genéticos em cada CP e no modelo multivariado, obtido através do Software STATISTICA.

Cabe ressaltar que, não foram usados métodos estatísticos para comparação dos parâmetros para os materiais genéticos devido à variação no número de indivíduos de cada clone, acarretado pela sua dificuldade de enraizamento e sobrevivência. Por se tratar de um estudo exploratório, se priorizou o quantitativo de exemplares genéticos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo 1 – Eficiência Foliar Quanto ao Uso de Recursos em Minicepas de Materiais Genéticos de *Corymbia*

3.1.1 Área Foliar Específica

A Área Foliar Específica (AFE) reflete a eficiência de uso de recursos em geral, com destaque para o carbono, já que relaciona a área fotossintética produzida por unidade de massa de matéria seca, que é composta majoritariamente de carbono, mas está também relacionada à eficiência no uso de outros recursos, como nutrientes minerais e água. A área foliar específica (AFE) representa um importante indicador morfofisiológico que reflete adaptações das plantas às condições ambientais e práticas de manejo (LIU *et al.*, 2023).

Em espécies florestais, ela reflete tanto a eficiência de utilização do carbono quanto as estratégias adaptativas para diferentes condições ambientais. A AFE é fundamental para a compreensão do balanço entre captura de luz, eficiência fotossintética e investimento em biomassa estrutural (POORTER *et al.*, 2019; WRIGHT *et al.*, 2022). A AFE também está relacionada às taxas de crescimento das plantas. Espécies com alta AFE geralmente apresentam maior capacidade de crescimento, pois possuem maior área fotossintética em relação ao investimento de biomassa, facilitando maior captura de luz e eficiência no uso de recursos. Contudo, essas folhas tendem a ser mais suscetíveis a estresses ambientais, como seca e herbivoria. Em contraste, espécies com baixa AFE, que produzem folhas mais espessas e duráveis, apresentam menor taxa de crescimento, mas maior resistência ambiental (PIERCE *et al.*, 2017; FRESCHET *et al.*, 2018).

Neste trabalho, há variação na AFE na população de materiais genéticos (Mgen) estudados (Tabela 4), refletindo as distintas eficiências de uso do carbono, como também observado para clones de eucalipto por TONINI *et al.* (2016). O menor valor de AFE, 12,70 m² kg⁻¹, foi observado no Mgen 69 e o

maior valor, $34,48 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, no Mgen 1. O quociente entre esses dois valores, 2,71, ou seja 171%, dá ideia da grande amplitude relativa da eficiência de uso de carbono na população de materiais genéticos estudados. A faixa típica, a que abrange 80% da população estudada, ou seja, do percentil 10 ao percentil 90, para a AFE, foi de $13,67$ a $27,11 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, uma amplitude considerável, de 98%.

Contudo, cabe avaliar, para ampla população de materiais genéticos de *Corymbia* o padrão de variação da AFE com a idade da árvore, uma vez que em *C. citriodora* houve redução da AFE ao longo do crescimento das árvores, como também observado para *E. camaldulensis* (ÁVILA, 2020) e, geralmente, se observa para outras espécies de *Eucalyptus*. Contrariamente, em povoamentos seminais de teca (*Tectona grandis*) a AFE aumentou significativamente com a idade das árvores, de $8,45 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, aos 17 meses, para $13,01 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ aos 90 meses, um aumento de 54% (BEHLING *et al.*, 2018).

A relação entre a Área Foliar Específica (AFE) medida em plantas na fase inicial de crescimento e em fases mais avançadas ou idades maiores reflete mudanças nas estratégias de alocação de recursos ao longo do ciclo de vida da planta. Essas mudanças são influenciadas por fatores como o estágio de desenvolvimento, demandas energéticas e adaptações ao ambiente.

Durante as fases iniciais, a AFE tende a ser mais elevada, uma vez que plantas jovens geralmente produzem folhas mais finas, leves e amplas. Essa característica permite maximizar a captação de luz e otimizar a fotossíntese para promover o rápido acúmulo de biomassa, essencial para o estabelecimento inicial da planta. Essa estratégia é especialmente observada em espécies pioneiras e em ambientes competitivos, onde o rápido crescimento inicial oferece vantagens adaptativas (POORTER *et al.*, 2019; FRESCHET *et al.*, 2018).

Plantas jovens também apresentam maior plasticidade na morfologia foliar, ajustando a AFE para explorar condições de luz e nutrientes no ambiente. A alta AFE, no entanto, está frequentemente associada a uma menor resistência estrutural, o que torna essas folhas mais vulneráveis a estresses ambientais, como seca e herbivoria.

Espécies florestais que habitam sub-bosques frequentemente apresentam maior AFE, caracterizada por folhas mais finas e amplas, otimizadas para captar a luz em ambientes sombreados. Por outro lado, plantas em ambientes de alta luminosidade geralmente exibem menor AFE, produzindo folhas mais espessas e resistentes, como uma adaptação para minimizar danos causados por excesso de radiação e perda de água (ONODA *et al.*, 2017; NIINEMETS, 2020). Essas diferenças são expressões de plasticidade fenotípica, um mecanismo adaptativo que permite às espécies ajuste de suas características foliares às condições ambientais.

Do ponto de vista prático, a determinação da AFE em estudos florestais é essencial para prever o desempenho das espécies em diferentes cenários ambientais e para desenvolver estratégias de manejo florestal sustentável. Recentemente, avanços tecnológicos, como o uso de software de análise de imagens, têm facilitado medições mais rápidas e precisas da AFE, permitindo análises em grande escala e com menor impacto destrutivo sobre as plantas (BINKLEY *et al.*, 2021).

À medida que a planta amadurece, a AFE geralmente diminui, pois, as folhas produzidas em fases mais avançadas tendem a ser mais espessas, com maior investimento em tecidos estruturais (como fibras e cutículas) para aumentar a resistência à seca, à herbivoria e a outros estresses. Isso reflete uma mudança de estratégia de alocação, priorizando a longevidade e a manutenção das folhas em vez do rápido crescimento.

Essa redução na AFE também está associada ao declínio da plasticidade fenotípica em plantas maduras. O investimento em folhas mais robustas e duráveis é particularmente vantajoso em ambientes onde os recursos são limitados ou em plantas de crescimento lento, como espécies de florestas tropicais maduras e ecossistemas xerofíticos (NIINEMETS, 2020).

A AFE representa um indicador vital das estratégias ecológicas e fisiológicas de espécies florestais, refletindo compromissos evolutivos entre eficiência fotossintética, alocação de biomassa e resiliência a estresses

ambientais. Estudos recentes reforçam sua importância para compreender respostas das florestas às mudanças climáticas e para o manejo de ecossistemas (POORTER *et al.*, 2019; WRIGHT *et al.*, 2022; ONODA *et al.*, 2017).

Estudos recentes têm demonstrado a estreita relação entre a AFE e o status nutricional das plantas, evidenciando sua importância como ferramenta para avaliação do estado nutricional e produtividade das culturas (ROSOLEM e HUSTED, 2024; WANG *et al.*, 2021).

3.1.2 Composição nutricional foliar

A análise da composição nutricional foliar da população de 53 materiais genéticos permite compreender padrões associados ao balanço de massa e ao equilíbrio nutricional, fundamentais para a caracterização e seleção de genótipos mais eficientes.

3.1.2.1 Grau de Balanço de Massa (teores) para Macronutrientes

Os teores foliares de macronutrientes apresentam significativa variação, refletindo diferenças no balanço de massa entre os materiais genéticos analisados. O Nitrogênio (N), com média de 29,62 g kg⁻¹ e amplitude variando de 19,96 g kg⁻¹ (P0) a 41,55 g kg⁻¹ (P100), é o nutriente predominante, indicando sua centralidade na composição foliar e importância no metabolismo da planta (LAMBERS *et al.*, 2008). Fósforo (P), essencial para o metabolismo energético, tem menor concentração, com média de 2,40 g kg⁻¹ e valores variando entre 1,42 g kg⁻¹ (P0) e 3,97 g kg⁻¹ (P100), o que reflete sua limitação comum em substratos arenosos. Potássio (K), com média de 13,88 g kg⁻¹, apresenta ampla variabilidade (8,68 g kg⁻¹ em P0 a 21,16 g kg⁻¹ em P100), associada ao seu papel na regulação osmótica e mobilidade no floema.

Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), elementos estruturais, têm médias de 8,31 g kg⁻¹ e 2,25 g kg⁻¹, respectivamente, com teores de Ca atingindo 13,16 g kg⁻¹ no percentil superior (P100). O Enxofre (S), com média de 1,86 g kg⁻¹, apresenta

menor variabilidade entre os percentis, sugerindo uma menor discrepância na assimilação deste nutriente na população analisada.

3.1.2.2 Grau de Balanço de Massa (teores) para Micronutrientes

Os micronutrientes exibem maior amplitude de variação, refletindo diferenças nas demandas metabólicas e na disponibilidade do substrato fertirrigado. Ferro (Fe), com média de 1776,1 mg kg⁻¹, destaca-se como o micronutriente mais abundante, variando entre 101,42 mg kg⁻¹ (P0) e 4631,1 mg kg⁻¹ (P100), demonstrando ampla heterogeneidade na absorção entre os genótipos (BRIAT *et al.*, 2020). Manganês (Mn), com média de 1399,8 mg kg⁻¹, também apresenta variação acentuada (554,4 mg kg⁻¹ em P0 a 3952,3 mg kg⁻¹ em P100). Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Boro (B) exibem médias de 7,88 mg kg⁻¹, 63,7 mg kg⁻¹ e 40,7 mg kg⁻¹, respectivamente, sendo que Boro apresenta teores críticos em percentis baixos, reforçando sua limitação comum em condições de cultivo em substratos drenantes (GUERRERO *et al.*, 2023).

3.1.3 Grau de Equilíbrio (Variáveis Multinutrientes z)

As variáveis multinutrientes z (zN a zB) são indicativas do equilíbrio relativo de cada nutriente. A variável zN, com média de 3,542, apresenta alta variabilidade (0,264 em P0 a 4,965 em P100). O Fósforo (zP), com média de 1,023, tem menor variação, indicando maior uniformidade entre os genótipos. Já zK, com média de 2,275, reflete diferenças significativas no equilíbrio do Potássio, associadas às suas altas variações nos teores foliares.

Entre os micronutrientes, zCu (-4,636 em média) destaca-se pela ampla amplitude de valores, variando entre -7,444 (P0) e -2,228 (P100), como ocorre de forma geral para as variáveis multinutrientes z de micronutrientes. Valores de zFe, zMn e zB também exibem amplitudes amplas, com zFe variando de -5,322 (P0) a -1,268 (P100), zMn de -3,614 (P0) a 1,161 (P100), e zB de -3,662 (P0) a -2,493 (P100). Essas amplitudes refletem a diversidade na resposta dos genótipos em relação ao equilíbrio nutricional para esses elementos.

3.1.4 Grau de Balanço Nutricional Conjunto da Composição Nutricional (g(x))

A variável $g(x)$, que representa a média geométrica da composição nutricional, apresenta valores médios de 0,863, variando de 0,598 (P0) a 1,184 (P100). Valores de $g(x)$ menores que 1,0 indicam diluição dos nutrientes na biomassa foliar, sugerindo maior eficiência na utilização do conjunto nutricional para a produção de massa de matéria seca. Este padrão é observado em genótipos mais eficientes, que conseguem maximizar o uso dos nutrientes disponíveis para crescimento e desenvolvimento. Por outro lado, valores de $g(x)$ superiores a 1,0 indicam concentração, refletindo menor eficiência de utilização do conjunto nutricional.

A amplitude dos valores de $g(x)$ na população avaliada reflete a diversidade no grau de eficiência nutricional dos materiais genéticos analisados. Genótipos com valores próximos a 1,0 apresentam um equilíbrio intermediário entre eficiência de utilização e concentração, indicando adaptações metabólicas para diferentes condições de disponibilidade de nutrientes. Este comportamento é consistente com o objetivo de identificar genótipos adaptados a condições de baixa fertilidade, caracterizadas pela necessidade de maximizar o uso dos recursos disponíveis (GUERRERO *et al.*, 2023).

3.1.5 Correlações entre Área Foliar Específica e Status Nutricional em Plantas

3.1.5.1 Correlações com Macronutrientes

A análise das correlações entre AFE e macronutrientes (Tabela 5) revelou padrões interessantes, com destaque para a correlação significativa positiva com S ($r = 0,377$, $p < 0,005$) e tendência positiva com N ($r = 0,219$, $p = 0,114$). Estes resultados corroboram com estudos recentes de Martínez-Peña *et al.* (2024), que demonstraram a importância do S na formação e expansão foliar. A relação positiva com N, mesmo que em nível de tendência, alinha-se com as descobertas

de Kumar *et al.* (2023) sobre o papel fundamental do N na síntese de proteínas e expansão celular.

3.1.5.2 Correlações com Micronutrientes

Entre os micronutrientes, observaram-se correlações significativas negativas com B ($r = -0,469$, $p < 0,001$), Cu ($r = -0,389$, $p < 0,004$) e Zn ($r = -0,356$, $p < 0,009$), apresentada na Tabela 5. Lu *et al.* (2020) reportaram padrões similares em estudos com diferentes espécies vegetais, sugerindo que estes micronutrientes podem influenciar a densidade e espessura do tecido foliar. A correlação negativa com B é particularmente relevante, considerando seu papel na formação da parede celular e expansão foliar (DAY *et al.*, 2020).

3.1.5.3 Correlação com o Grau de Balanço Nutricional Global

A tendência de correlação negativa entre AFE e $g(x)$ ($r = -0,218$, $p = 0,113$), como mostra a Tabela 5, sugere uma possível relação entre o balanço nutricional global e a estrutura foliar. Este padrão foi similarmente observado em estudos recentes (CHEN *et al.*, 2023; WENDLING *et al.*, 2016), indicando que o desbalanço nutricional pode influenciar a morfologia foliar.

3.1.5.4 Correlação com o Grau de Equilíbrio da Composição Nutricional Foliar

A análise das correlações entre a AFE e as variáveis multinutrientes revelou padrões mais robustos, com maior número de correlações significativas (Tabela 5). As correlações significativas da AFE com zN, zP e zS, apresentadas na Tabela 5, sugerem uma forte interação entre o grau de equilíbrio destes nutrientes e a morfologia foliar.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas para Área Foliar Específica (AFE), teores foliares de nutrientes, média geométrica da composição nutricional g(X) e variáveis multinutrientes (zN, ZP, ..., zB) da população de materiais genéticos (53) de *Corymbia* estudados na fase de minicepas.

Variável	Unidade	n	Média	Desvio-padrão	P0 (menor valor)	P10	P20	P30	P40	P50 (mediana)	P60	P70	P80	P90	P100 (maior valor)
AFE	m ² kg ⁻¹	53	19,40	5,119	12,70	13,67	14,50	15,38	17,37	18,01	18,97	21,65	23,41	27,11	34,48
N	g kg ⁻¹	53	29,62	4,821	19,96	23,82	25,23	27,01	28,28	29,04	30,07	31,47	33,38	35,29	41,55
P	g kg ⁻¹	53	2,40	0,505	1,42	1,87	2,02	2,14	2,22	2,31	2,45	2,71	2,76	2,94	3,97
K	g kg ⁻¹	53	13,88	2,587	8,68	10,45	11,42	13,01	13,55	13,86	14,53	14,78	15,40	17,27	21,16
Ca	g kg ⁻¹	53	8,71	2,490	3,65	5,52	6,32	7,24	7,71	8,62	9,69	10,16	10,88	12,14	13,15
Mg	g kg ⁻¹	53	2,25	0,461	1,51	1,65	1,83	1,96	2,10	2,27	2,34	2,44	2,60	2,81	3,85
S	g kg ⁻¹	53	2,16	0,359	1,50	1,80	1,87	1,98	2,04	2,08	2,16	2,30	2,41	2,54	3,48
Cu	mg kg ⁻¹	53	8,7	3,07	3,9	5,6	6,2	6,6	7,3	7,9	8,4	9,7	11,7	13,2	17,8
Fe	mg kg ⁻¹	53	177,6	101,42	38,1	73,3	88,6	106,2	123,5	162,0	189,0	217,6	250,2	290,9	463,1
Zn	mg kg ⁻¹	53	63,7	26,09	28,7	35,5	39,4	41,5	50,5	56,7	66,4	80,4	90,8	100,9	127,8
Mn	mg kg ⁻¹	53	1806,5	808,20	554,4	929,2	1141,6	1257,1	1399,8	1710,2	1885,5	2186,5	2458,3	2951,1	3952,3
B	mg kg ⁻¹	53	40,7	18,66	13,0	18,2	19,8	26,1	34,6	39,8	45,6	52,8	56,3	64,4	88,7
g(x)	-	53	0,863	0,1693	0,598	0,627	0,714	0,734	0,806	0,849	0,880	0,961	1,062	1,093	1,184
zN	-	53	3,542	0,2664	3,076	3,205	3,263	3,373	3,451	3,520	3,630	3,716	3,830	3,907	3,993
zP	-	53	1,023	0,2311	0,616	0,737	0,795	0,876	0,925	0,962	1,100	1,183	1,245	1,347	1,487
zK	-	53	2,779	0,2750	2,159	2,391	2,506	2,606	2,741	2,851	2,915	2,968	3,021	3,148	3,179
zCa	-	53	2,287	0,1920	1,780	2,088	2,148	2,192	2,242	2,278	2,329	2,410	2,458	2,496	2,713
zMg	-	53	0,959	0,2092	0,414	0,758	0,812	0,869	0,930	0,973	1,032	1,054	1,092	1,180	1,475
zS	-	53	0,925	0,2195	0,489	0,635	0,701	0,782	0,860	0,914	0,990	1,075	1,141	1,214	1,402
zCu	-	53	-4,636	0,2257	-5,244	-4,869	-4,787	-4,742	-4,669	-4,639	-4,583	-4,533	-4,453	-4,316	-4,101
zFe	-	53	-1,718	0,4371	-2,777	-2,266	-2,099	-2,004	-1,888	-1,755	-1,611	-1,415	-1,337	-1,150	-0,878
zZn	-	53	-2,667	0,2472	-3,311	-2,910	-2,876	-2,786	-2,753	-2,701	-2,649	-2,474	-2,446	-2,372	-2,080
zMn	-	53	0,656	0,3914	-0,132	0,161	0,273	0,464	0,584	0,653	0,779	0,861	1,020	1,104	1,611
zB	-	53	-3,150	0,3545	-3,878	-3,662	-3,574	-3,332	-3,223	-3,071	-3,018	-2,882	-2,837	-2,742	-2,493

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson entre a Área Foliar Específica (AFE) e variáveis da composição nutricional foliar de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de minicepas.

Variável	r com AFE	p valor	Variável	r com AFE	p valor
			g(x)	-0,218	0,116
N	0,219	0,114	zN	0,286	0,038
P	0,121	0,388	zP	0,307	0,025
K	0,029	0,839	zK	0,177	0,204
Ca	-0,122	0,384	zCa	0,080	0,569
Mg	0,108	0,442	zMg	0,304	0,027
S	0,377	0,005	zS	0,454	0,001
Cu	-0,389	0,004	zCu	-0,442	0,001
Fe	0,091	0,515	zFe	0,134	0,338
Zn	-0,356	0,009	zZn	-0,478	0,000
Mn	-0,183	0,189	zMn	-0,054	0,702
B	-0,469	0,000	zB	-0,547	0,000

3.1.6 Alocação dos materiais genéticos em gráficos de quadrantes

Os materiais genéticos foram alocados em quadrantes com base na relação entre AFE e o teor de cada nutriente, considerando suas médias, apresentado entre a Figura 1 e a Figura 6. Como explicado no item 2.1.5, os quadrantes foram numerados de 1 a 4, a partir do quadrante superior direito em sentido anti-horário. O foco da interpretação e discussão recai sobre os materiais genéticos nos Quadrantes 1 e 4, pois são aqueles, em conjunto, indicativos de maior eficiência no uso de carbono. Especialmente no Quadrante 4, como os materiais além de maior AFE têm menores teores de nutrientes, eles combinam alta eficiência no uso de carbono e do nutriente mineral.

Figura 1 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (N ou P (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).

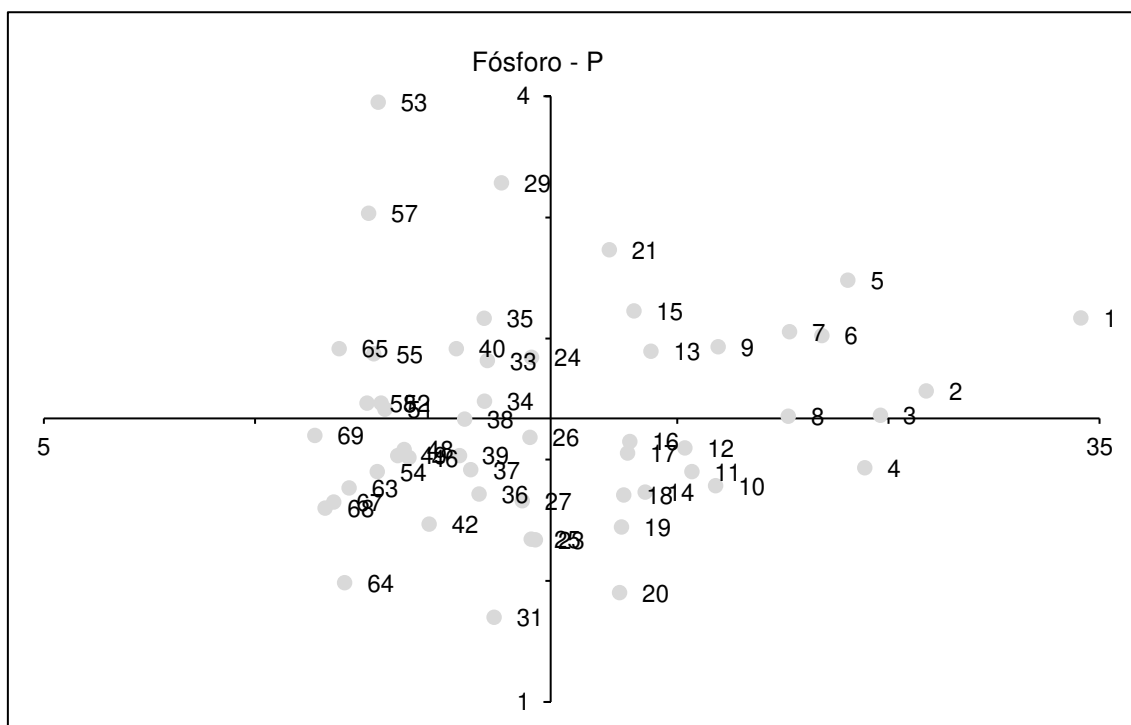
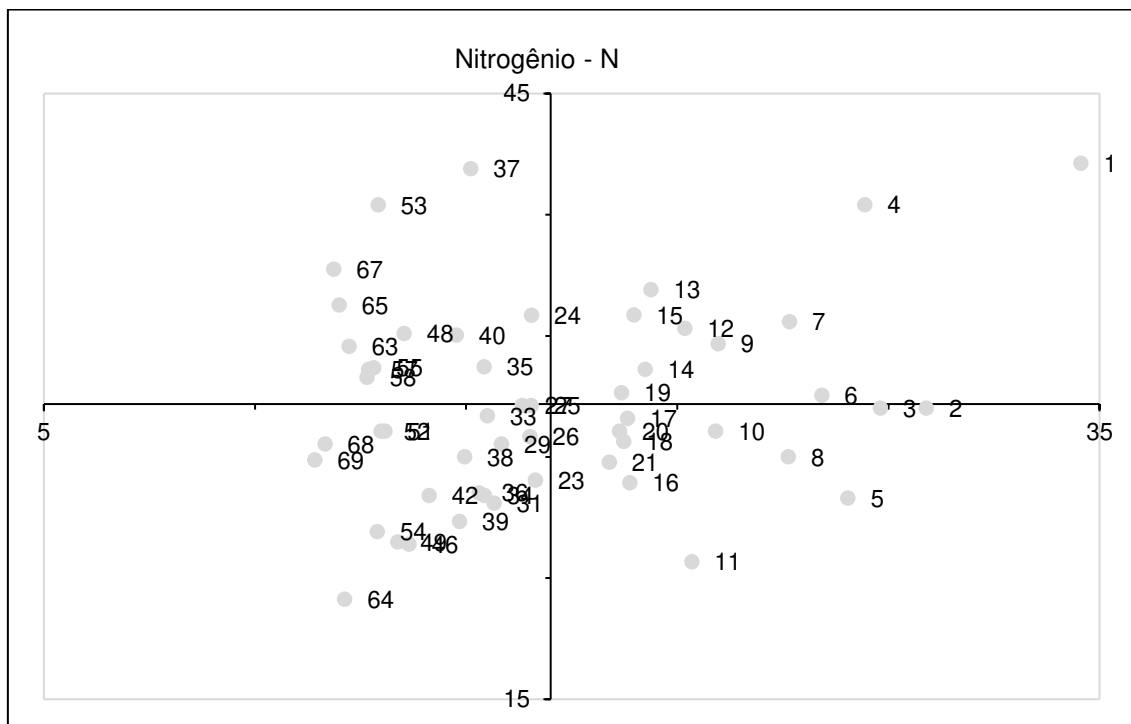


Figura 2 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (K ou Ca (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).

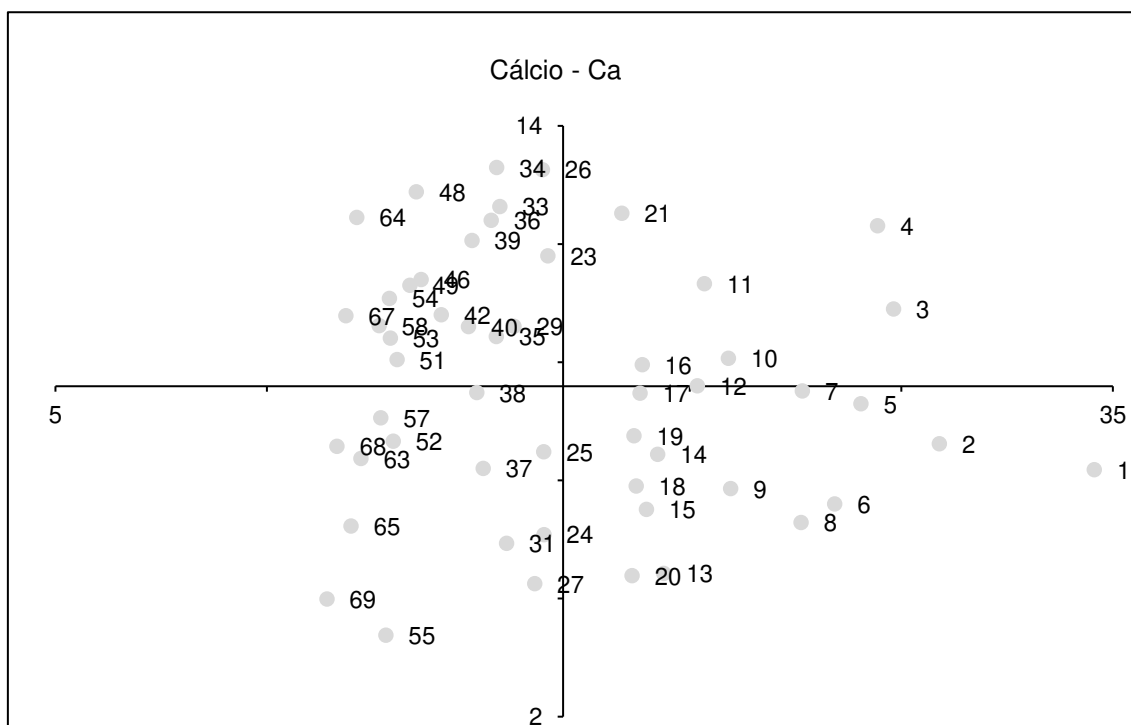
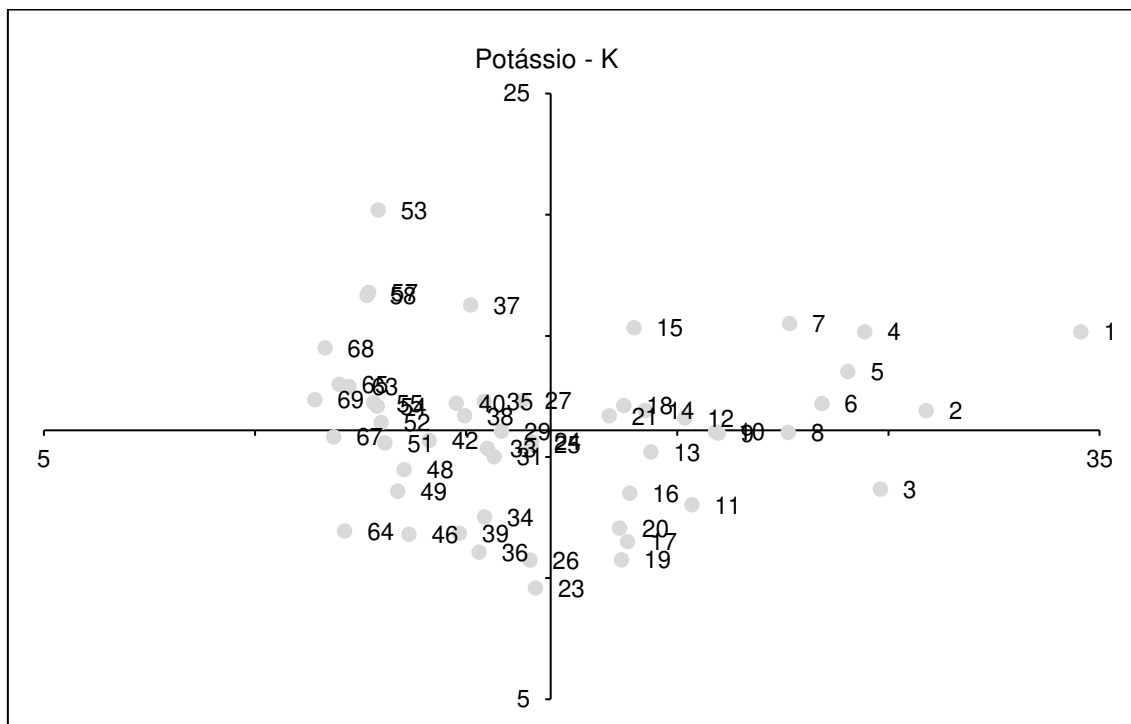


Figura 3 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Mg ou S (eixo vertical, g kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).

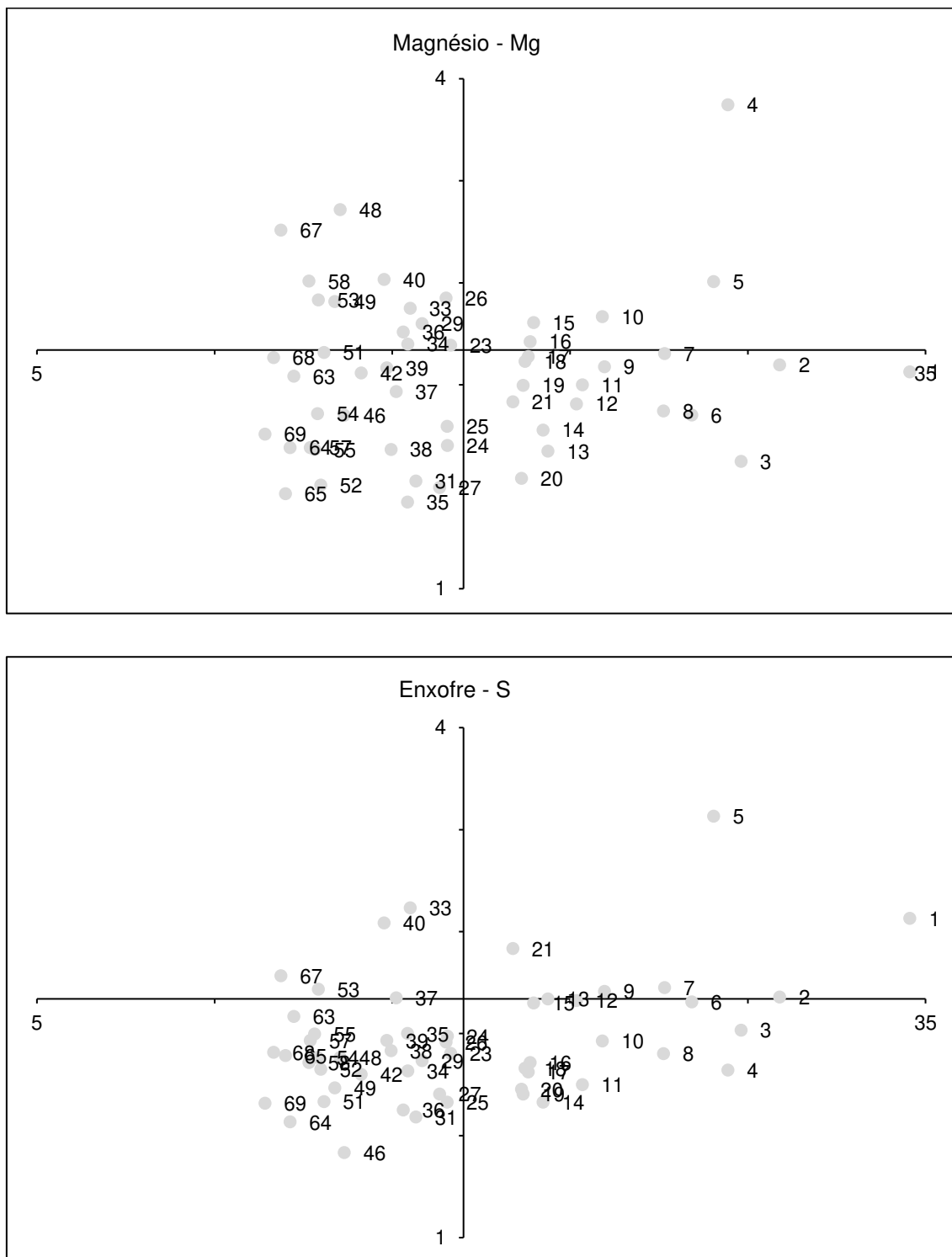


Figura 4 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepça, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Cu ou Zn (eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹).

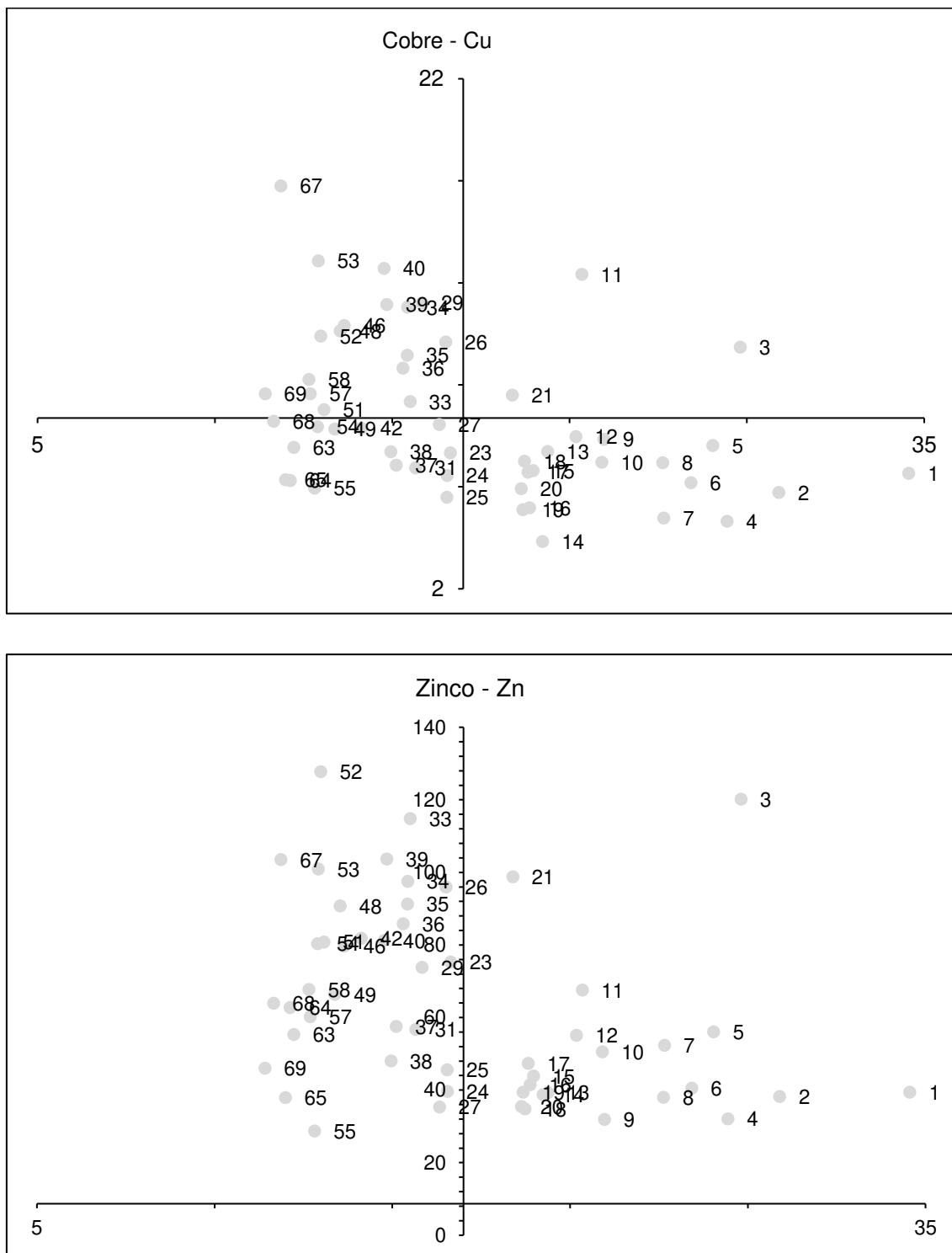


Figura 5 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar do nutriente (Fe ou Mn (eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹).

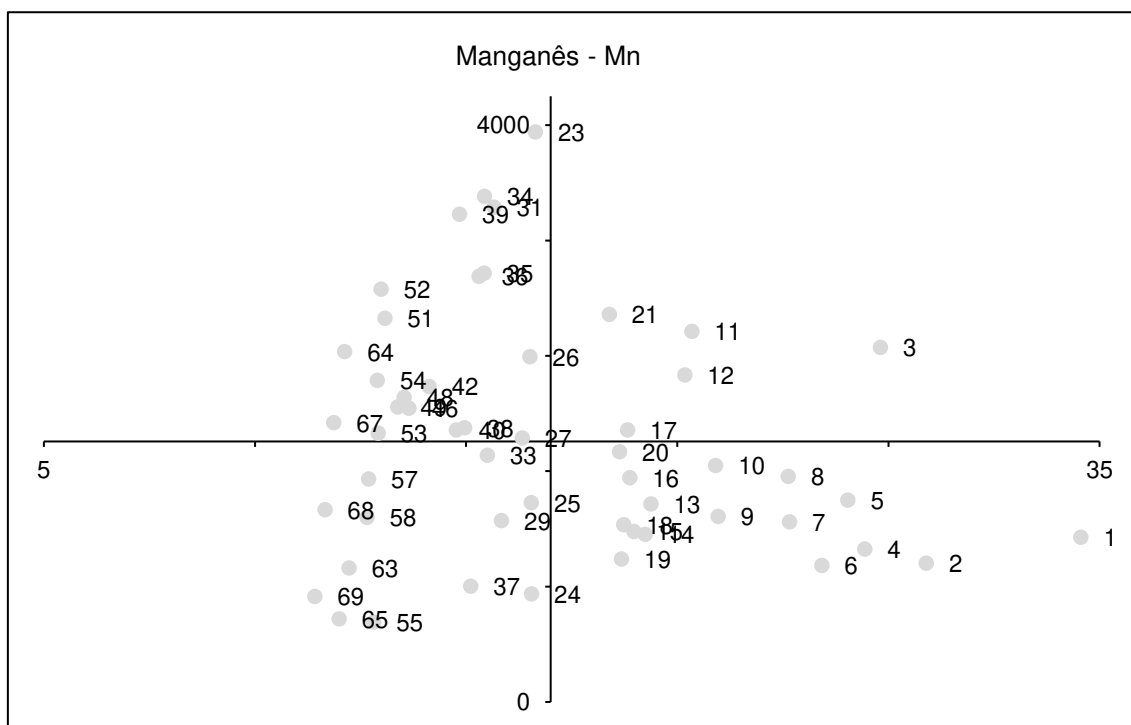
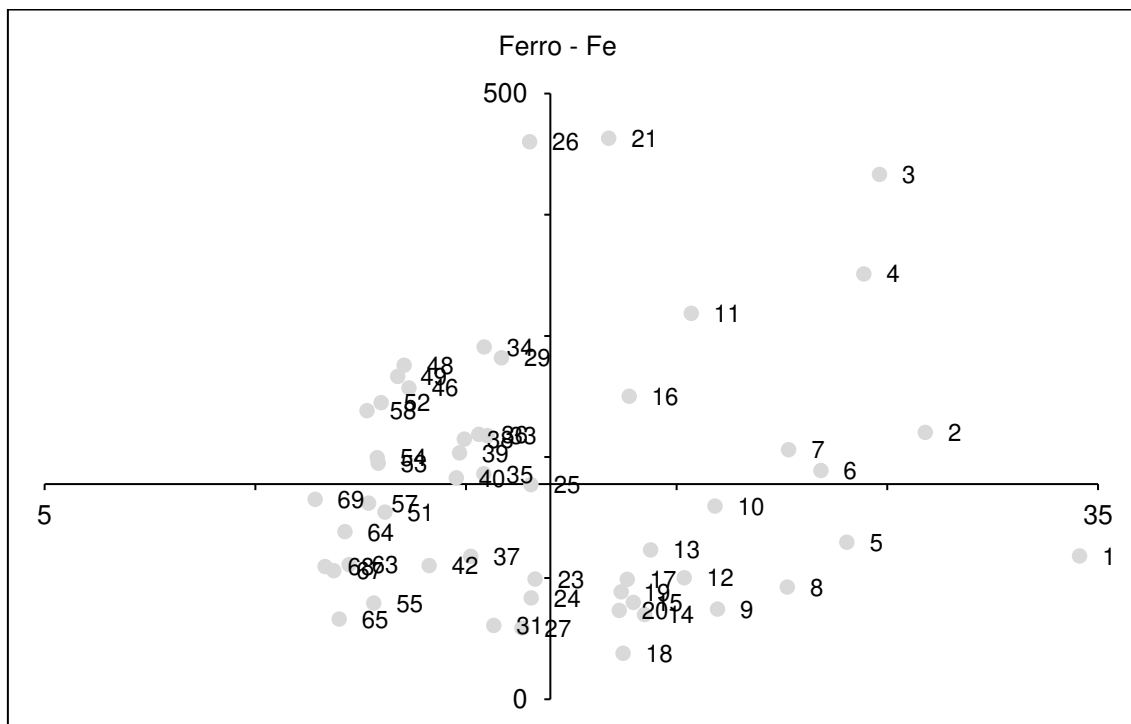
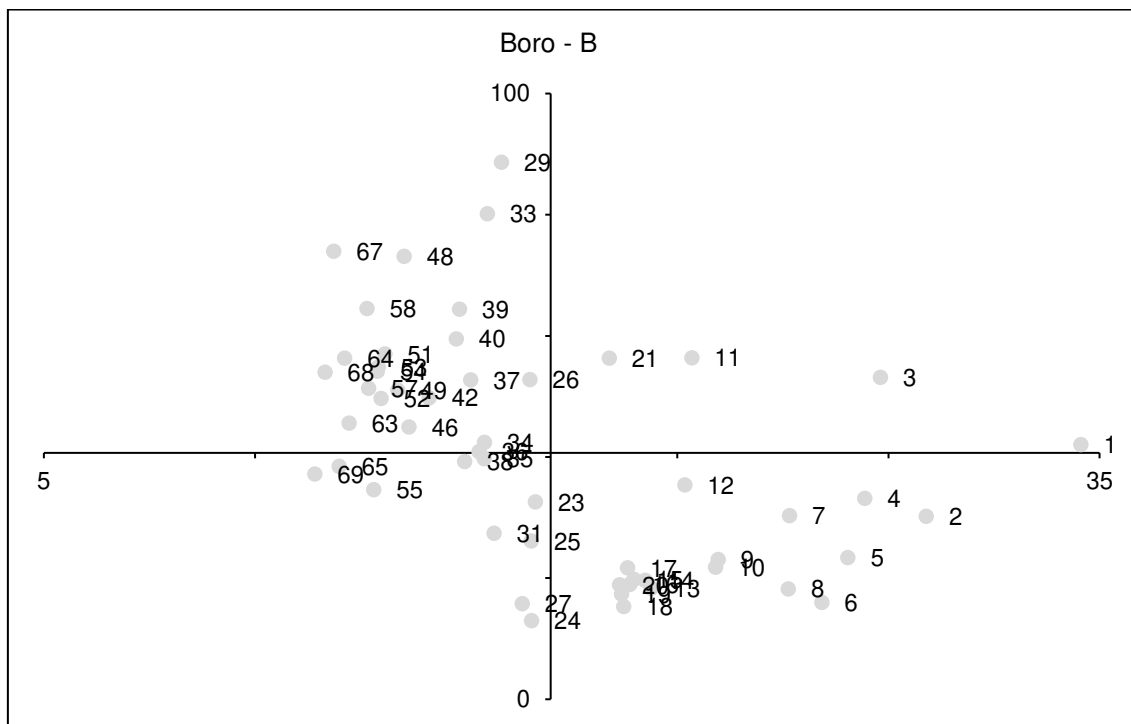


Figura 6 – Dispersão de 53 materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de mini-cepa, codificados numericamente, em quadrantes do relacionamento do teor foliar de B ((eixo vertical, mg kg⁻¹) versus a área foliar específica AFE (eixo horizontal, m² kg⁻¹)).



A análise da alocação dos materiais genéticos (MGENCODs) nos quadrantes, baseada na eficiência de uso de carbono (AFE) e no teor de nutrientes foliares (Tabela 6 e Tabela 7), revela padrões importantes que refletem o comportamento nutricional e fisiológico desses materiais. Os resultados obtidos permitem identificar oportunidades para o melhoramento genético e manejo nutricional mais eficiente, contribuindo para aumentar a produtividade de espécies do gênero *Corymbia*.

Maiores frequências de materiais genéticos alocados nos quadrantes 2 e 3 considerados em conjunto em relação aos quadrantes 1 e 4 em conjunto. Como observado para todos os nutrientes na Tabela 7, há indicativo que a maioria dos materiais genéticos, em torno de 60%, apresenta baixa eficiência de uso de carbono para produção de superfície fotossintetizante. Considerando os macronutrientes N, P, K e S, a frequência de materiais genéticos alocados no quadrante 3 é maior do que no quadrante 2, indicando que os materiais genéticos

com baixa eficiência de uso do carbono mais frequentemente têm alta eficiência de uso desses nutrientes minerais, exceto principalmente para o Ca e para o Mg.

Esse padrão observado para o Ca, também ocorre para micronutrientes, com a exceção do Fe. A função estrutural do Ca na parede celular e como sinalizador, torna-o menos responsivo a ajustes fisiológicos para aumentar a eficiência de uso (WHITE & BROADLEY, 2003). Já os micronutrientes, cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn) e manganês (Mn) desempenham papéis catalíticos como cofatores de enzimas (BROADLEY *et al.*, 2022), mas sua absorção e redistribuição podem ser limitados em solos tropicais com alta fixação e pH ácido (SILVA *et al.*, 2023).

Os materiais genéticos alocados nos quadrantes 1 e 4 representam em torno de 40% de toda a população (Tabela 7). As maiores frequências no quadrante 4 indicam materiais que têm a capacidade de combinar alta eficiência de uso de carbono e de nutrientes minerais, como ocorre em relação a N, Ca e, em magnitude ainda mais evidente, para todos os micronutrientes. Esse padrão é consistente com a necessidade desses nutrientes no metabolismo primário e na fotossíntese, como descrito por Santos *et al.* (2021). A elevada eficiência no uso de nitrogênio (N), por exemplo, é crítica para a síntese de clorofila e enzimas envolvidas na fotossíntese (HAWKESFORD *et al.*, 2020).

Em relação ao B, sua elevada eficiência de uso pode estar relacionada às baixas concentrações exigidas para funções críticas, como a estabilidade da parede celular e o transporte de carboidratos (BROWN *et al.*, 2002). De todo modo, para P, K, Mg e S, as frequências de materiais genéticos alocados no quadrante 1 são maiores, ainda que pouco, do que no quadrante 4, padrão consistente com estudos que indicam trade-offs entre alocação de recursos para crescimento e eficiência de uso de nutrientes (LAMBERS & POORTER, 2020).

As informações derivadas da análise da Tabela 6 e da Tabela 7 permitem algumas proposições quanto ao manejo e ao melhoramento. Nesse sentido, em relação ao manejo nutricional, os resultados sugerem que devem ser feitos ajustes na composição da solução nutritiva utilizada, especialmente para Ca e

micronutrientes como Cu, Fe, Zn e Mn, visando o aumento de suas eficiências de uso.

Em relação à seleção genética os materiais genéticos alocados predominantemente no Quadrante 4, estes são candidatos promissores para programas de melhoramento que visem harmonizar alta eficiência de carbono e de nutrientes minerais.

Diante disso, realizou-se a investigação dos padrões apresentados pelos materiais genéticos, por meio da análise da correlação não paramétrica entre os quadrantes de alocação (Tabela 8). O maior número de correlações significativas ($p < 0.10$) ocorre para os micronutrientes e para o Ca, e o menor para Mg (Tabela 8).

Aprofundando na análise dessa tabela, cabe considerar o sinal dos coeficientes de correlação, para derivar padrões. Dessa forma, por exemplo, para as correlações significativas e de sinal positivo entre os quadrantes de alocação de N, K e S (Tabela 8) evidenciam padrão de mesma tendência quanto à eficiência de uso de carbono e nutrientes minerais dos grupos de materiais genéticos neles alocados, como também observado para os quadrantes de alocação de P, K e S, e de modo contrário ao observado para P e Ca.

A correlações significativas e positivas entre os quadrantes de alocação dos materiais genéticos para Ca e todos os micronutrientes evidenciam padrões de mesma tendência em relação à eficiência de uso de carbono e nutrientes.

Tabela 6 - Quadrante de alocação dos materiais genéticos de *Corymbia*, na fase de minicepa, com base no relacionamento entre a área foliar específica e o teor foliar de cada nutriente.

MgenCod	Quadrante do Relacionamento entre a AFE e o teor foliar do nutriente										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
1	1	1	1	4	1	1	4	4	4	4	1
2	4	1	1	4	1	1	4	1	4	4	4
3	4	1	4	1	4	1	1	1	1	1	1
4	1	4	1	1	1	4	4	1	4	4	4
5	4	1	1	4	1	1	4	4	4	4	4
6	1	1	1	4	4	1	4	1	4	4	4
7	1	1	1	4	1	1	4	1	4	4	4
8	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	1	1	4	4	1	1	4	4	4	4	4
10	4	4	4	1	1	4	4	4	4	4	4
11	4	4	4	1	4	4	1	1	1	1	1
12	1	4	1	1	4	1	4	4	4	1	4
13	1	1	4	4	4	1	4	4	4	4	4
14	1	4	1	4	4	4	4	4	4	4	4
15	1	1	1	4	1	1	4	4	4	4	4
16	4	4	4	1	1	4	4	1	4	4	4
17	4	4	4	4	1	4	4	4	4	1	4
18	4	4	1	4	1	4	4	4	4	4	4
19	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
20	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
21	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
23	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2	3
24	2	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3
25	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
26	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2
27	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3
29	3	2	3	2	2	3	2	2	2	3	2
31	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3
33	3	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2
34	3	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2
35	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	3
36	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2
37	2	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2
38	3	3	2	3	3	3	3	2	3	2	3
39	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2
40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
42	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2
46	3	3	3	2	3	3	2	2	2	2	2
48	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2
49	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2
51	3	2	3	2	2	3	2	3	2	2	2
52	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2
53	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
54	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2
55	2	2	2	3	3	2	3	3	3	3	3
57	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	2
58	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	2
63	2	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2
64	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2
65	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
67	2	3	3	2	2	2	2	3	2	2	2
68	3	3	2	3	2	3	3	3	2	3	2
69	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3

Tabela 7 - Frequência Absoluta e Relativa de materiais genéticos alocados em cada quadrante do relacionamento entre área foliar específica (AFE) e o teor foliar de cada nutriente.

Quadrante	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
Frequência Absoluta de materiais genéticos											
1	10	11	11	7	11	11	3	8	3	5	4
4	11	10	10	14	10	10	18	13	18	16	17
2	12	13	15	19	16	9	17	16	20	20	22
3	20	19	17	13	16	23	15	16	12	12	10
Frequência Relativa (%) de materiais genéticos											
1	18,87	20,75	20,75	13,21	20,75	20,75	5,66	15,09	5,66	9,43	7,55
4	20,75	18,87	18,87	26,42	18,87	18,87	33,96	24,53	33,96	30,19	32,08
2	22,64	24,53	28,30	35,85	30,19	16,98	32,08	30,19	37,74	37,74	41,51
3	37,74	35,85	32,08	24,53	30,19	43,40	28,30	30,19	22,64	22,64	18,87

Tabela 8 - Matriz de Correlação entre a alocação nos quadrantes do relacionamento da AFE com o teor de cada nutriente.

	Q_AFE, N	Q_AFE, P	Q_AFE, K	Q_AFE, Ca	Q_AFE, Mg	Q_AFE, S	Q_AFE, Cu	Q_AFE, Fe	Q_AFE, Zn	Q_AFE, Mn	Q_AFE, B
Coeficiente de correlação não paramétrica de Spearman (R)											
Q_AFE,N	1,000	0,189	0,351	-0,224	-0,062	0,386	-0,187	-0,141	-0,237	-0,257	-0,128
Q_AFE,P	0,189	1,000	0,239	-0,270	0,050	0,733	0,111	0,152	0,062	-0,166	0,123
Q_AFE,K	0,351	0,239	1,000	-0,205	0,118	0,399	-0,139	0,107	-0,172	-0,171	-0,068
Q_AFE,Ca	-0,224	-0,270	-0,205	1,000	0,005	-0,127	0,595	0,531	0,649	0,603	0,523
Q_AFE,Mg	-0,062	0,050	0,118	0,005	1,000	0,028	-0,197	0,028	-0,142	-0,231	-0,108
Q_AFE,S	0,386	0,733	0,399	-0,127	0,028	1,000	0,047	0,109	0,028	0,004	0,119
Q_AFE,Cu	-0,187	0,111	-0,139	0,595	-0,197	0,047	1,000	0,530	0,923	0,695	0,825
Q_AFE,Fe	-0,141	0,152	0,107	0,531	0,028	0,109	0,530	1,000	0,544	0,339	0,422
Q_AFE,Zn	-0,237	0,062	-0,172	0,649	-0,142	0,028	0,923	0,544	1,000	0,748	0,851
Q_AFE,Mn	-0,257	-0,166	-0,171	0,603	-0,231	0,004	0,695	0,339	0,748	1,000	0,620
Q_AFE,B	-0,128	0,123	-0,068	0,523	-0,108	0,119	0,825	0,422	0,851	0,620	1,000
n° de R _p <0,10	4	3	3	6	1	3	5	5	6	7	5

A identificação dos padrões quanto ao uso de carbono e de nutrientes minerais para cada material genético estudado pode trazer informações específicas capazes de nortear ajustes no manejo da nutrição, sendo úteis também na seleção de materiais genéticos para distintas condições de meio de crescimento. Assim, elaborou-se, a Tabela 9, que mostra a frequência de alocação nos quadrantes, para cada material genético, bem como um índice de alocação. Desse modo, por exemplo, no material genético 1 (MgenCod 1), dos

11 nutrientes, 6 foram alocados no quadrante 1 (Q1) e 5 no Q4, correspondendo às frequências relativas de 54,5% e 45,5%, respectivamente, sendo que o quociente entre a frequência de alocação no Q4 em relação ao Q1+Q4 resulta no valor de 0,455 para o índice de alocação. Já no MgenCod 20, em relação a todos os nutrientes, a alocação se deu no Q4, resultando num índice de alocação de 100% no Q4, indicando que esse material tem alta eficiência de uso de carbono e de todos os nutrientes minerais.

No grupo de materiais genéticos 1 a 21, todos integrantes da subpopulação de alta eficiência de uso de carbono (Q1 e Q4, Tabela 9). O índice de alocação no quadrante que indica alta eficiência de uso de nutrientes minerais (Q4) foi, em termos médios, maior (0,636) e com menor variabilidade média (cv 33,5%), como mostra a Tabela 10, comparativamente ao verificado em termos médios para o grupo correspondente no grupo de materiais com baixa eficiência de uso de carbono (média de 0,491, cv 51%). Considerando os 11 nutrientes minerais estudados, o valor de 0,636 acima referido indica que, no grupo de materiais com alta eficiência de uso de carbono, em termos médios, os materiais genéticos têm também alta eficiência de uso de sete (7) nutrientes; em contraste, a alta eficiência de uso de nutrientes ocorre, em média, para cinco (5) nutrientes, aproximadamente.

Tabela 9 - Frequência de alocação nos quadrantes do relacionamento entre a AFE e o teor foliar de nutrientes para os materiais genéticos de *Corymbia* estudados.

MgenCod	Frequência de nutrientes por Quadrante do Relacionamento com a AFE								Índice de Alocação	
	Absoluta				Relativa (%)				Q4/(Q1+Q4)	Q3/(Q2+Q3)
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4		
1	6	0	0	5	54,5	0,0	0,0	45,5	0,455	
2	5	0	0	6	45,5	0,0	0,0	54,5	0,545	
3	8	0	0	3	72,7	0,0	0,0	27,3	0,273	
4	5	0	0	6	45,5	0,0	0,0	54,5	0,545	
5	4	0	0	7	36,4	0,0	0,0	63,6	0,636	
6	5	0	0	6	45,5	0,0	0,0	54,5	0,545	
7	6	0	0	5	54,5	0,0	0,0	45,5	0,455	
8	1	0	0	10	9,1	0,0	0,0	90,9	0,909	
9	4	0	0	7	36,4	0,0	0,0	63,6	0,636	
10	2	0	0	9	18,2	0,0	0,0	81,8	0,818	
11	6	0	0	5	54,5	0,0	0,0	45,5	0,455	
12	5	0	0	6	45,5	0,0	0,0	54,5	0,545	
13	3	0	0	8	27,3	0,0	0,0	72,7	0,727	
14	2	0	0	9	18,2	0,0	0,0	81,8	0,818	
15	5	0	0	6	45,5	0,0	0,0	54,5	0,545	
16	3	0	0	8	27,3	0,0	0,0	72,7	0,727	
17	2	0	0	9	18,2	0,0	0,0	81,8	0,818	
18	2	0	0	9	18,2	0,0	0,0	81,8	0,818	
19	1	0	0	10	9,1	0,0	0,0	90,9	0,909	
20	0	0	0	11	0,0	0,0	0,0	100,0	1,000	
21	9	0	0	2	81,8	0,0	0,0	18,2	0,182	
23	0	4	7	0	0,0	36,4	63,6	0,0	0,636	
24	0	3	8	0	0,0	27,3	72,7	0,0	0,727	
25	0	0	11	0	0,0	0,0	100,0	0,0	1,000	
26	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
27	0	2	9	0	0,0	18,2	81,8	0,0	0,818	
29	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
31	0	1	10	0	0,0	9,1	90,9	0,0	0,909	
33	0	8	3	0	0,0	72,7	27,3	0,0	0,273	
34	0	8	3	0	0,0	72,7	27,3	0,0	0,273	
35	0	9	2	0	0,0	81,8	18,2	0,0	0,182	
36	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
37	0	4	7	0	0,0	36,4	63,6	0,0	0,636	
38	0	3	8	0	0,0	27,3	72,7	0,0	0,727	
39	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
40	0	11	0	0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,000	
42	0	5	6	0	0,0	45,5	54,5	0,0	0,545	
46	0	6	5	0	0,0	54,5	45,5	0,0	0,455	
48	0	8	3	0	0,0	72,7	27,3	0,0	0,273	
49	0	6	5	0	0,0	54,5	45,5	0,0	0,455	
51	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
52	0	7	4	0	0,0	63,6	36,4	0,0	0,364	
53	0	11	0	0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,000	
54	0	6	5	0	0,0	54,5	45,5	0,0	0,455	
55	0	4	7	0	0,0	36,4	63,6	0,0	0,636	
57	0	5	6	0	0,0	45,5	54,5	0,0	0,545	
58	0	9	2	0	0,0	81,8	18,2	0,0	0,182	
63	0	4	7	0	0,0	36,4	63,6	0,0	0,636	
64	0	3	8	0	0,0	27,3	72,7	0,0	0,727	
65	0	3	8	0	0,0	27,3	72,7	0,0	0,727	
67	0	8	3	0	0,0	72,7	27,3	0,0	0,273	
68	0	4	7	0	0,0	36,4	63,6	0,0	0,636	
69	0	2	9	0	0,0	18,2	81,8	0,0	0,818	

Tabela 10 - Estatísticas descritivas para o índice de alocação dos materiais genéticos de *Corymbia* no quadrante de alta eficiência de uso de nutrientes minerais, conforme o grupo de eficiência de uso de carbono.

Grupo de materiais genéticos quanto ao uso de carbono	Índice de alocação no quadrante de alta eficiência nutricional ^{1/}						
	média	cv (%)	mínimo	quartil 1	quartil 2	quartil 3	máximo
Alta eficiência	0,636	33,5	0,182	0,545	0,636	0,818	1,000
Baixa eficiência	0,491	51,0	0,000	0,341	0,455	0,659	1,000

1/ Q4 / (Q1+Q4) para alta eficiência no uso de C; Q3 / (Q2+Q3) para baixa eficiência no uso de C

3.1.7 Relacionamentos Multivariados Entre a AFE e a Composição Nutricional Foliar

3.1.7.1 Grupo de Materiais Genéticos

Para o grupo de 53 materiais genéticos, ou seja, para toda a população estudada, a PCA realizada considerou a AFE e os teores de nutrientes (PCAt), de modo a avaliar toda a variabilidade em relação às eficiências de uso de carbono e nutrientes minerais.

Para o conjunto completo de 53 materiais genéticos a PCA revelou que os teores foliares de micronutrientes, como Ca, Cu, Zn, Mn e B, foram as variáveis com maior contribuição (em conjunto 76,5%) no CP1, componente que explica 35,57% da variância total (Tabela 11). Esses resultados sugerem que a eficiência de uso de Ca e de micronutrientes desempenha um papel central na diferenciação nutricional dos genótipos de *Corymbia*. Estudos recentes reforçam a importância dos micronutrientes na regulação de processos enzimáticos essenciais para o metabolismo primário e secundário das plantas (ASSUNÇÃO *et al.*, 2022). Esses nutrientes têm papel significativo na fotossíntese, transporte de açúcares e estabilidade das membranas.

Tabela 11 - Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (“loadings”) e contribuições relativas da área foliar específica e dos teores de nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para toda a população de 53 materiais genéticos estudados.

Variável	Loadings			Contribuição das Variáveis (%)			
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	Modelo
AFE	0,3837	-0,2045	0,7989	3,5	1,5	43,9	5,9
N	0,4036	-0,6859	-0,0925	3,8	16,6	0,6	7,2
P	-0,0156	-0,7819	-0,1080	0,0	21,6	0,8	6,2
K	0,3606	-0,7261	-0,3325	3,1	18,6	7,6	7,8
Ca	-0,8601	-0,0710	0,3435	17,4	0,2	8,1	11,8
Mg	-0,3187	-0,4597	0,4129	2,4	7,5	11,7	4,5
S	0,0761	-0,7572	0,2179	0,1	20,3	3,3	6,1
Cu	-0,7740	-0,2587	-0,2953	14,1	2,4	6,0	10,2
Fe	-0,6725	-0,2093	0,3799	10,6	1,5	9,9	8,0
Zn	-0,8960	-0,1458	-0,1379	18,9	0,8	1,3	12,4
Mn	-0,7152	0,3829	0,0971	12,0	5,2	0,6	9,2
B	-0,7763	-0,3312	-0,2992	14,2	3,9	6,2	10,6
Autovalor	4,2559	2,8291	1,4545				
Variância Explicada (%)	35,5	23,6	12,1				
Variância Explicada Cumulativa (%)	35,5	59,0	71,2				

No CP2, que explicou 23,58% da variação, os macronutrientes P, K e S foram significativos, enquanto o teor de N mostrou tendência à significância (Tabela 11). Esse padrão sugere uma estrutura de variação complementar ao CP1, refletindo a importância dos macronutrientes na eficiência metabólica. Tal padrão é consistente com achados que destacam o papel do P e K na otimização do crescimento em ambientes com diferentes restrições nutricionais (LAMBERS, 2022).

A menor contribuição da AFE no modelo multivariado (5,9%), variável cujo *loading* é significativo apenas no CP3 (Tabela 11), reforça que, nesse grupo amplo de 53 materiais genéticos estudados, a variabilidade nutricional supera as diferenças na eficiência de uso de carbono.

3.1.7.2 Materiais Genéticos com Alta Eficiência de Uso de Carbono

A PCA realizada para o grupo composto por 21 materiais genéticos com alta eficiência de uso de C que apresenta AFE maior do que a média, considerou

apenas os teores de nutrientes, de modo a avaliar a estrutura da eficiência de uso dos nutrientes minerais no grupo de materiais com alta eficiência de uso de carbono.

Para os materiais genéticos de alta eficiência no uso de carbono (AFE superior à média), os micronutrientes e o cálcio emergiram novamente como dominantes no CP1, explicando 41,3% da variância e 77,5% do modelo (Tabela 12). Este padrão é consistente com estudos que associam alta AFE à demanda otimizada por elementos estruturais e cofatores enzimáticos. O fortalecimento da relevância dos macronutrientes P, K e S no CP2 (68,5% de contribuição neste componente) destaca o papel desses nutrientes no suporte à alta eficiência fotossintética, corroborando achados de Lambers *et al.* (2008).

O teor de Mg, significativo apenas no CP3 (Tabela 12), reforça sua contribuição em situações específicas de alta eficiência de carbono. Pesquisas indicam que o Mg desempenha funções críticas na estabilização de clorofilas e na transferência de energia em sistemas fotossintéticos (BROADLEY *et al.*, 2021), embora sua relevância seja modulada por fatores genotípicos e ambientais.

Tabela 12 – Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (“loadings”) e contribuições relativas dos teores de nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para o grupo de 21 materiais genéticos com alta eficiência no uso de carbono.

Variável	Loadings			Contribuição das Variáveis (%)			
	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	Modelo
N	0,3964	-0,5544	0,1555	3,5	11,0	1,6	5,2
P	-0,2132	-0,7750	-0,4875	1,0	21,5	15,3	7,3
K	0,1928	-0,8816	0,0041	0,8	27,8	0,0	7,6
Ca	-0,7368	-0,2332	0,5822	12,0	1,9	21,8	10,2
Mg	0,1285	-0,5580	0,6928	0,4	11,1	30,8	5,5
S	-0,1401	-0,7345	-0,5256	0,4	19,3	17,8	6,6
Cu	-0,8171	0,1595	-0,2536	14,7	0,9	4,1	10,4
Fe	-0,8208	-0,2288	0,3162	14,8	1,9	6,4	10,9
Zn	-0,9106	-0,0226	-0,1443	18,3	0,0	1,3	12,3
Mn	-0,8723	0,2868	-0,0945	16,8	2,9	0,6	12,0
B	-0,8877	-0,2182	0,0693	17,4	1,7	0,3	12,0
Autovalor	4,5382	2,7985	1,5558				
Variância Explicada (%)	41,3	25,4	14,1				
Variância Explicada Cumulativa (%)	41,3	66,7	80,8				

Não obstante as similaridades derivadas da análise dos PCA realizados para toda a população e para o grupo de 21 materiais mais eficientes no uso de carbono, parece interessante se ter PCA para o grupo de 32 materiais genéticos de baixa eficiência de uso de carbono, de modo a permitir comparação, esperada, mais sensível entre esses grupos mais e menos eficientes no uso de carbono.

3.1.7.3 Materiais Genéticos com Baixa Eficiência de Uso de Carbono

A PCA para materiais de baixa eficiência no uso de carbono, que contempla 32 genótipos, revelou padrões distintos em relação aos grupos anteriores. O CP1, dominado por Ca e micronutrientes (88,8% de contribuição no CP1, Tabela 13), apresenta padrões similares aos observados nos genótipos de alta AFE. Contudo, o aumento da relevância do Mg neste grupo (13% de contribuição no CP1 versus 0,4% no CP1 do grupo com alta AFE) sugere que materiais de baixa eficiência de carbono dependem mais deste nutriente para processos metabólicos básicos. Estudos relatam que maior dependência de Mg pode estar associada a estratégias compensatórias em plantas sob limitações de carbono (HUBER; JONES., 2013).

O CP2 destacou os macronutrientes N, P, K e S, com padrões opostos ao Mn (Tabela 13). Esses resultados refletem possíveis trade-offs entre a eficiência no uso de macronutrientes e micronutrientes em materiais menos eficientes no uso de carbono. Esse comportamento é consistente com as teorias de alocação de recursos descritas por Cao & Worley (2013).

Tabela 13 - Autovalores, variância explicada, coeficientes de carga nos fatores (*“loadings”*) e contribuições relativas dos teores de nutrientes minerais nos componentes principais e no modelo multivariado, para o grupo de 32 materiais genéticos com baixa eficiência no uso de carbono.

Variável	Loadings		Contribuição das Variáveis (%)		
	CP1	CP2	CP1	CP2	Modelo
N	0,1334	-0,8592	0,4	23,4	8,6
P	-0,1887	-0,7033	0,8	15,7	6,1
K	0,3088	-0,8101	2,2	20,8	8,8
Ca	-0,8817	0,2706	18,3	2,3	12,6
Mg	-0,7443	-0,2471	13,0	1,9	9,1
S	-0,2935	-0,7189	2,0	16,4	7,1
Cu	-0,7706	-0,2933	14,0	2,7	10,0
Fe	-0,7235	0,1125	12,3	0,4	8,1
Zn	-0,8768	0,0078	18,1	0,0	11,7
Mn	-0,4920	0,6325	5,7	12,7	8,2
B	-0,7457	-0,3341	13,1	3,5	9,7
Autovalor	4,2506	3,1506			
Variância Explicada (%)	38,6	28,6			
Variância Explicada Cumulativa (%)	38,6	67,3			

3.1.7.4 Comparações Entre Grupos

A comparação entre os grupos de alta e baixa eficiência no uso de carbono evidencia padrões consistentes em relação à dominância dos micronutrientes no CP1, indicando sua importância universal para a eficiência nutricional. No entanto, a maior contribuição do Mg e do Mn em materiais de baixa AFE sugere diferenças na alocação de recursos, potencialmente ligadas a estratégias menos eficientes de aquisição e uso de carbono. Essas diferenças destacam a necessidade de estratégias específicas de manejo nutricional para maximizar o desempenho de materiais genéticos distintos (KRAMER & BOYER, 1995).

3.2 Estudo 2 – Parâmetros Morfológicos e Fisiológicos de Clones Comerciais de *Corymbia* spp. na Fase de Mudanças

3.2.1 Análises Morfológicas

Os resultados das análises morfológicas realizadas com clones comerciais de *Corymbia* spp. na fase de mudas revelaram diferenças entre os materiais genéticos avaliados, especialmente em relação à altura, diâmetro do coleto, massas de matéria fresca e seca, e índice de qualidade de Dickson, IQD (Tabela 14). Esses parâmetros são fundamentais para a avaliação da qualidade inicial das mudas e podem influenciar diretamente o desempenho em campo, conforme apontado por Binotto *et al.* (2023).

Tabela 14 - Dados morfológicos e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas.

Material Genético	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Relação altura/diâmetro	PA fresca (g)	PA seca (g)	Raiz fresca (g)	Raiz seca (g)	IQD
K33	14,9	2,86	5,21	2,22	0,64	0,78	0,22	0,11
SI0520	20,4	2,73	7,51	2,88	0,97	1,05	0,25	0,11
1013	11,0	1,17	9,40	0,85	0,35	0,41	0,07	0,03
1014	15,5	2,69	5,80	1,14	0,58	0,88	0,11	0,06
1016	13,3	3,13	4,44	1,10	0,39	1,03	0,13	0,07
1017	14,2	2,42	6,56	0,70	0,55	0,67	0,07	0,04
1018	16,2	2,85	5,68	2,02	0,58	0,93	0,20	0,09
I-144	20,0	2,80	7,30	2,82	0,77	1,24	0,22	0,09
Média	15,7	2,58	6,49	1,72	0,60	0,87	0,16	0,08

PA= Parte aérea; IQD= Índice de Qualidade de Dickson.

A altura das mudas variou entre 13,3 e 20,4 cm, com média de 15,7 cm (Tabela 14). Os valores observados no presente estudo são inferiores àqueles reportados por Bernardi *et al.* (2012), que descreveram altura entre 15 e 20 cm em mudas de *Corymbia citriodora* provenientes de sementes. Essa discrepância pode ser atribuída ao menor tamanho inicial das mudas utilizadas no experimento atual. Além disso, os valores de altura são consistentes com o padrão de desenvolvimento inicial mais lento frequentemente observado em

espécies do gênero *Corymbia* em comparação ao gênero *Eucalyptus* (SILVA *et al.*, 2018).

O diâmetro do coleto apresentou média de 2,58 mm, com ampla variação entre os clones (1,17 a 3,13 mm), como mostra a Tabela 14. O clone 1013 apresentou o menor valor de diâmetro, refletindo um índice altura/diâmetro elevado (9,40).

A relação altura/diâmetro do coleto é capaz de inferir acerca da qualidade de mudas florestais, por relacionar acúmulo de reserva na parte aérea e sua resistência e fixação no solo, uma vez que, o diâmetro do coleto é inversamente proporcional à estabilidade da muda em campo (STURION & ANTUNES, 2000). De acordo com Santos *et al.* (2006), essa relação pode impactar negativamente a resistência mecânica das mudas em campo, uma vez que menores diâmetros estão associados à menor estabilidade após o plantio. Para *C. citriodora*, lossaqui (2024) observou valores entre 6,04 e 15,14 para esta relação de acordo com a fertirrigação para mudas via semínifera. Vale ressaltar que, o tempo para crescimento das plantas foi superior ao comparado com o presente trabalho.

As massas de matéria fresca e seca também variaram amplamente entre os clones (Tabela 14). O clone SI0520 apresentou os maiores valores de massa fresca (2,88 g) e massa seca (0,97 g) da parte aérea, indicando maior capacidade de acúmulo de biomassa. Por outro lado, os clones 1013 e 1017 apresentaram os menores valores, destacando-se como materiais genéticos com potencial limitado para alocação de biomassa durante a fase inicial de crescimento. A ausência de dados para experimento semelhantes para o gênero e sua similaridade com o gênero *Eucalyptus*, implica em comparação entre estes (SMITH, 2005). Em Pinto *et al.* (2011), onde as plantas cresceram em solução nutritiva e continha o clone I-144, a média para altura foi de 58,1 cm e 5,27 mm para diâmetro do coleto. Assim como no presente trabalho, o diâmetro do coleto apresenta menor amplitude de valores, no entanto, ambos variam de acordo com o material genético. A diferença nos valores se deve ao tamanho do transplante das mudas na solução nutritiva, mas o crescimento é proporcional. Seguindo

essa comparação, a massa seca da parte aérea dos clones de *Eucalyptus* teve média de 9,07 g e das raízes de 1,76 g e com variação de acordo com o material genético, identificado também por Lima *et al.* (2005). Pode-se observar também, menor desenvolvimento inicial de espécies do gênero *Corymbia*.

O IQD variou de 0,03 (clone 1013) a 0,11 (clones K33 e SI0520), com média de 0,08 (Tabela 14). Embora os valores absolutos sejam inferiores aos reportados por Oliveira *et al.* (2023) para *Corymbia citriodora* (entre 3,24 e 14,19), é importante considerar que o IQD é influenciado diretamente pela biomassa acumulada e pela distribuição proporcional entre parte aérea e raízes. Assim, clones como K33 e SI0520, que apresentaram maior altura e massa seca, também demonstraram maior potencial de qualidade para o plantio, conforme descrito por Binotto *et al.* (2010).

Em relação à comparação com o clone comercial I-144, pertencente ao gênero *Eucalyptus*, a altura (20,0 cm) e a massa de matéria fresca da parte aérea (2,82 g) destacam-se como superiores em relação à média dos clones de *Corymbia* (Tabela 14). Esses resultados corroboram a observação de que clones de *Eucalyptus* apresentam maior crescimento inicial em comparação ao gênero *Corymbia* (SILVA *et al.*, 2018). No entanto, considerando o desempenho proporcional do clone SI0520 em relação aos demais clones de *Corymbia*, pode-se inferir que este material genético apresenta potencial competitivo mesmo em relação ao *Eucalyptus*.

Por fim, os resultados obtidos reforçam a relevância dos parâmetros morfológicos, como altura, diâmetro do coleto e IQD, na seleção de materiais genéticos de alto desempenho. Clones como K33 e SI0520 destacam-se como promissores para condições de campo, devido ao maior acúmulo de biomassa e melhor relação altura/diâmetro, indicando maior estabilidade e produtividade em longo prazo.

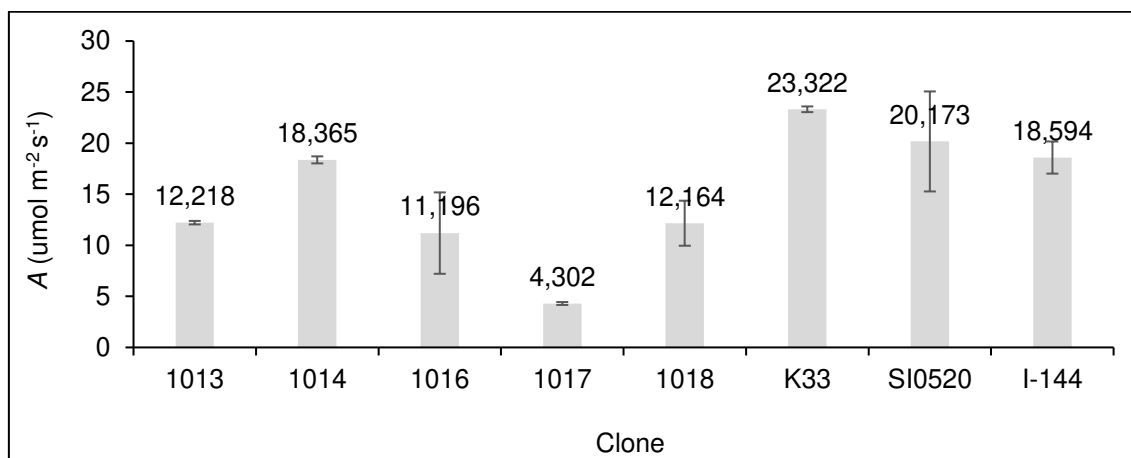
3.2.2 Análises Fisiológicas

3.2.2.1 Fotossíntese Líquida (A)

As taxas de fotossíntese líquida (*A*) diferiram amplamente entre os clones avaliados, com destaque para os clones K33 (23,322 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e SI0520 (20,173 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), que apresentaram os maiores valores, enquanto o clone 1017 registrou a menor taxa, 4,302 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 7). A média geral de *A* para os clones de *Corymbia* foi de 14,534 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o que reflete a influência do material genético na capacidade fotossintética. Estudos recentes indicam que taxas mais elevadas de *A* estão frequentemente associadas à maior produção de biomassa, embora essa relação não seja linear, devido a interações complexas entre fatores genéticos e ambientais (ZHANG *et al.*, 2023).

Em comparação ao clone I-144 (*Eucalyptus*), que obteve 12,94 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em condições controladas (SANTOS, 2019), os clones de *Corymbia* demonstraram maior variabilidade, o que pode refletir diferenças intrínsecas nos mecanismos de adaptação. Tais diferenças indicam que clones como K33 e SI0520 possuem maior potencial fotossintético, o que os torna candidatos promissores para regiões com alta demanda por produtividade.

Figura 7 - Taxa de fotossíntese líquida (A) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).



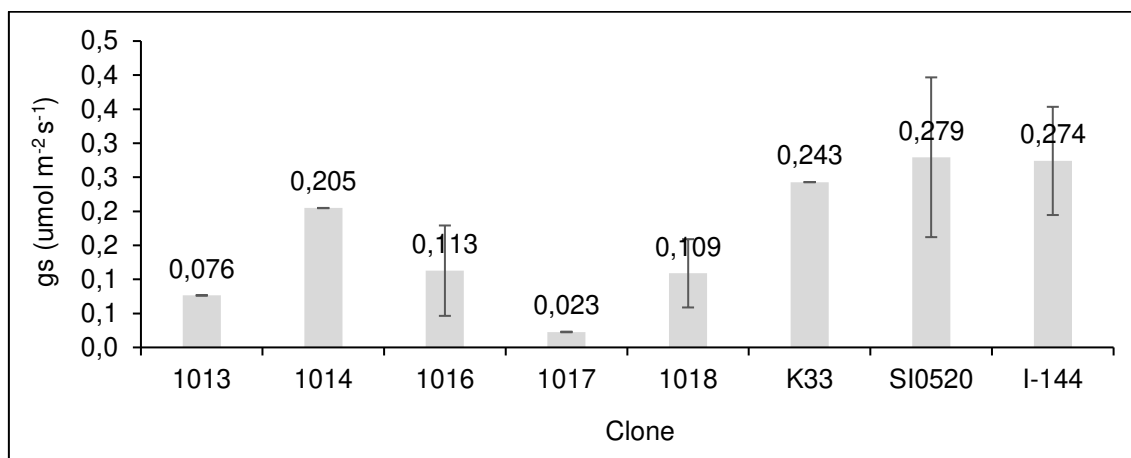
3.2.2.2 Condutância Estomática (g_s)

A condutância estomática (g_s) também variou amplamente entre os clones, com o SI0520 apresentando o maior valor ($0,279 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), enquanto o clone 1017 registrou o menor ($0,023 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), como mostra a Figura 8. A média para os clones de *Corymbia* foi de $0,150 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Estudos recentes sugerem que valores elevados de g_s estão correlacionados a maiores taxas de troca gasosa, favorecendo a fotossíntese e a transpiração (BURRIDGE *et al.*, 2022). Entretanto, o clone 1017, apesar de apresentar baixa g_s , não comprometeu a eficiência do uso da água, conforme discutido adiante.

Em ambientes externos, a g_s tende a ser mais elevada devido à influência de fatores como temperatura e umidade relativa (AWAD & CASTRO, 2021). No entanto, em condições controladas, esses fatores são minimizados, resultando em valores mais consistentes entre os genótipos avaliados.

Figura 8 - Condutância Estomática (gs) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).

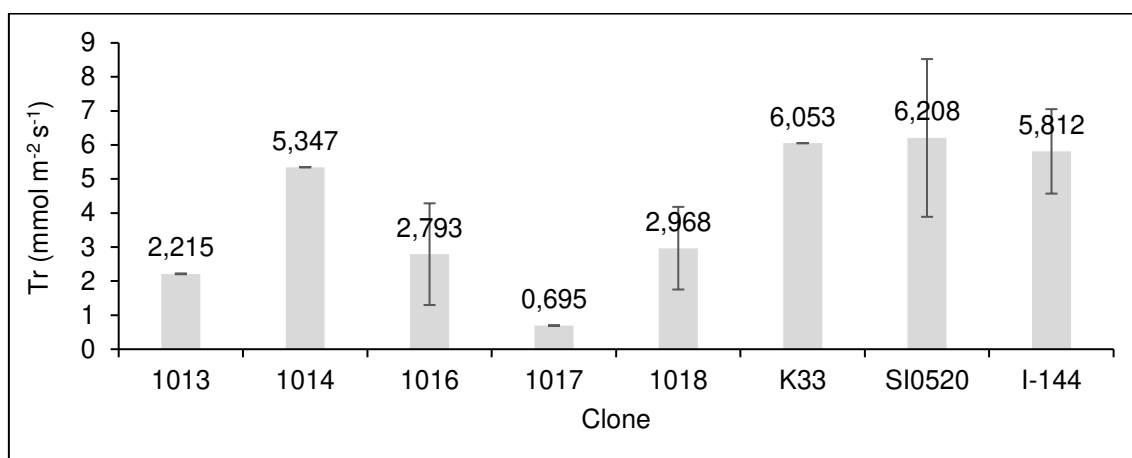


3.2.2.3 Transpiração (Tr)

A taxa de transpiração (Tr) seguiu padrões semelhantes aos observados para A e g_s . Os clones SI0520 ($6,208 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e K33 ($6,053 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) registraram os maiores valores, enquanto o clone 1017 apresentou a menor Tr ($0,695 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), apresentado na Figura 9. A média geral para os clones de *Corymbia* foi de $3,754 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Segundo Marenco *et al.* (2013), taxas elevadas de transpiração podem ser favorecidas pela estabilidade de condições como temperatura amena e alta umidade relativa em câmaras de crescimento, minimizando estresses hídricos.

Em comparação aos dados obtidos por Santos (2019) em condições externas, a Tr em câmaras de crescimento apresenta valores intermediários, refletindo a redução de variações sazonais. Isso indica que clones como SI0520 e K33 são mais eficientes em manter altos níveis de troca gasosa, mesmo em condições menos variáveis.

Figura 9 - Taxa Transpiratória (Tr) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).

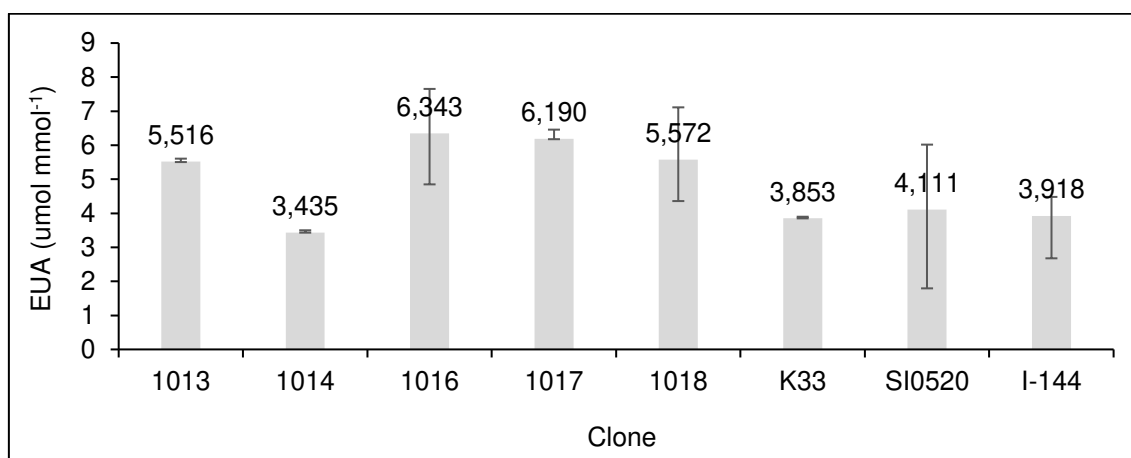


3.2.2.4 Eficiência do Uso da Água (EUA)

A eficiência do uso da água (EUA) foi superior nos clones 1016 (6,343 $\mu\text{mol mmol}^{-1}$) e 1017 (6,190 $\mu\text{mol mmol}^{-1}$), mostrado na Figura 10. Apesar de apresentarem baixos valores de A e g_s , esses clones demonstraram alta capacidade de retenção de água e otimização do uso desse recurso. Clones como SI0520 e K33, embora tenham altas taxas fotossintéticas e de transpiração, não foram tão eficientes quanto ao uso da água devido à alta perda por transpiração.

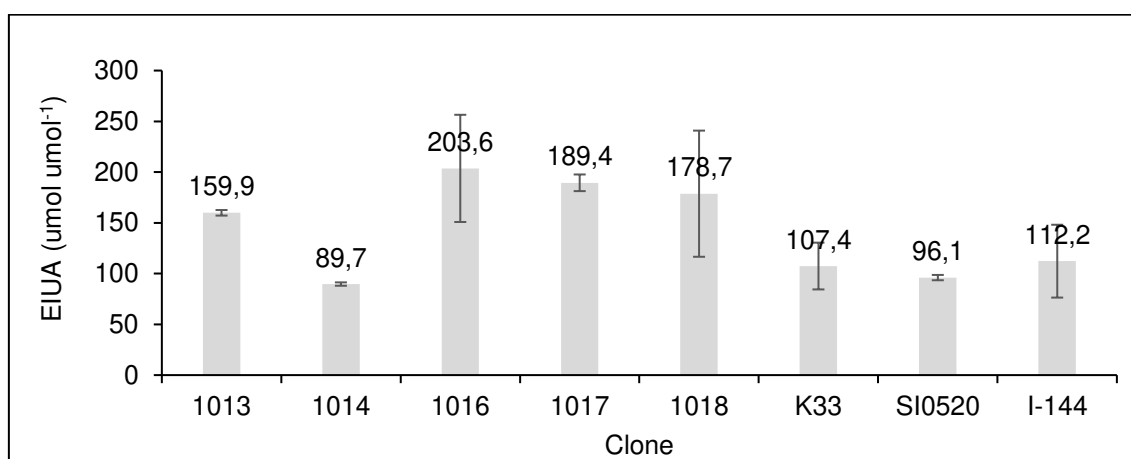
De acordo com Muller *et al.* (2011), a EUA é crucial em cenários de déficit hídrico, pois genótipos com maior eficiência podem sustentar o crescimento mesmo sob restrições de água. Assim, clones como 1017 e 1016 apresentam maior potencial para condições adversas, sendo relevantes para programas de melhoramento genético.

Figura 10 - Eficiência de Uso de Água (EUA) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).



No que diz respeito à EIUA, os materiais genéticos têm eficiências próximas, comparado à EUA, isso é explicado pela mesma sequência dos valores de condutância estomática e transpiração. Diante disso, se tem para EIUA a sequência decrescente deste parâmetro: 1016 > 1017 > 1018 > 1013 > > I-144 > SI0520 > K33 > 1014, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Eficiência Intrínseca de Uso de Água (EIUA) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).



A EIUA pode ser descrita como a quantidade de água transpirada para determinada biomassa produzida por meio da fotossíntese, além de imprimir a capacidade de enfrentamento ao déficit hídrico (LIMA, 1995; SILVA & SILVA, 2007). Devido às condições de mudanças climáticas, cabe ressaltar a importância de estudos com materiais genéticos com valores superiores desse parâmetro,

como 1016, 1017 e 1018. Este último, por exemplo, apresenta valores de qualidade de muda satisfatórios, com potencial para estudos de melhoramento genético.

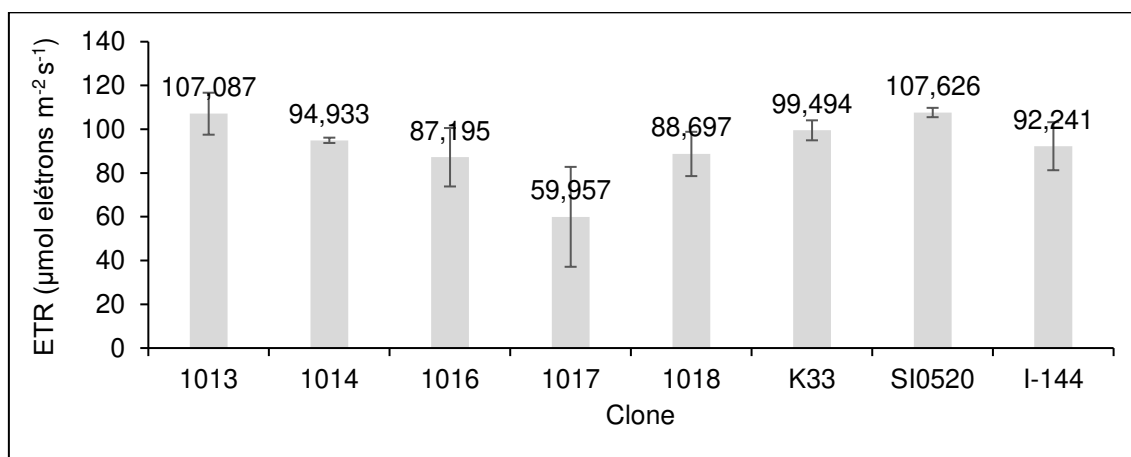
Por fim, os valores encontrados para EIU para espécies de *Eucalyptus* (CASTRO 2017; LIMA *et al.*, 2019) são inferiores quando comparados ao do presente trabalho, devido às menores gs em materiais genéticos de *Corymbia*, como abordado por Santos, 2019.

3.2.2.5 Taxa Aparente de Transporte de Elétrons (ETR)

Os clones SI0520 ($107,626 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e 1013 ($107,087 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) apresentaram as maiores taxas aparentes de transporte de elétrons (ETR), enquanto o clone 1017 obteve o menor valor ($59,957 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) apresentado na Figura 12. A média geral para os clones de *Corymbia* foi de $92,141 \mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

A ETR reflete a eficiência na transferência de energia nos fotossistemas e pode ser reduzida em situações de estresse, como déficit hídrico, devido à dissipação de energia em forma de calor (SHARMA *et al.*, 2023). Em condições controladas, como no presente estudo, as taxas elevadas indicam a capacidade de alguns clones em manter altos níveis de eficiência fotoquímica, o que é essencial para sustentar o crescimento inicial.

Figura 12 - Taxa Aparente de Transporte de Elétrons (ETR) para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas (média e intervalo de confiança a 95%).



Em relação aos parâmetros fisiológicos analisados destacam-se os clones SI0520 e K33 como os mais promissores em termos de produtividade, devido às altas taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração. Por outro lado, os clones 1016 e 1017 apresentaram maior eficiência no uso da água, o que os torna candidatos ideais para regiões com baixa disponibilidade hídrica. A variabilidade observada entre os clones reforça a importância de estudos fisiológicos na seleção de genótipos adaptados a diferentes condições ambientais.

3.3 Estudo 3 – Eficiência Nutricional de Clones Comerciais de *Corymbia* spp. na Fase de Mudanças

3.3.1 Teores de P, K, Ca e Mg na Parte Aérea e nas Raízes

Os teores dos macronutrientes analisados evidenciaram padrões distintos de alocação entre a parte aérea e as raízes dos clones de *Corymbia*. Na parte aérea, o potássio (K) apresentou os maiores teores em todos os materiais genéticos, seguido por cálcio (Ca), fósforo (P) e magnésio (Mg), Tabela 15. Este padrão, com média geral de $K > Ca > P > Mg$, é coerente com a função essencial do K na regulação osmótica e no metabolismo fotossintético (TRIPLER *et al.*, 2006).

Tabela 15 - Teores de P, K, Ca e Mg na parte aérea para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* na fase de mudas.

Material Genético	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)
K33	5,06	21,90	12,37	4,58
SI0520	4,10	23,29	10,80	3,48
1013	3,10	12,73	7,66	1,91
1014	4,18	21,69	11,56	3,08
1016	4,19	16,53	10,11	2,62
1017	3,15	16,00	12,54	3,17
1018	4,50	15,52	13,52	3,01
I-144	4,86	17,80	16,95	4,36

P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio.

A variabilidade nos teores entre os clones, como o alto valor de Mg no clone 1017 (Tabela 15), indica possíveis diferenças na capacidade de absorção ou redistribuição de nutrientes entre os tecidos. Em contrapartida, nas raízes, a média dos teores também seguiu o padrão $K > Ca > P > Mg$, com exceção de clones como o 1013, que apresentou maior concentração de K e P em relação aos demais (Tabela 16). Segundo Chen *et al.* (2023), essa variação na alocação pode ser atribuída a características genéticas e ao desenvolvimento inicial das mudas.

Tabela 16 - Teores de P, K, Ca e Mg nas raízes para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* na fase de mudas.

Material Genético	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)
K33	2,92	11,68	3,04	0,39
SI0520	2,43	12,48	7,52	2,72
1013	7,20	22,52	0,24	1,12
1014	2,81	6,40	13,14	1,36
1016	2,40	9,00	8,95	1,88
1017	1,66	6,12	11,22	0,69
1018	2,24	11,52	5,66	0,86
I-144	2,67	10,48	5,50	1,01

A comparação com plantas adultas de *C. citriodora* (ÁVILA, 2020) revela que os teores de macronutrientes são consideravelmente maiores na fase de mudas, o que pode ser explicado pela alta taxa de metabolismo e crescimento durante esse estágio (PINTO *et al.*, 2011).

3.3.2 Eficiência de Absorção (EA)

Os dados de eficiência de absorção (EA) mostram uma hierarquia dos nutrientes minerais, sendo K o mais eficientemente absorvido, seguido de Ca, P e Mg (Tabela 17). Clones como o 1014 apresentaram os maiores índices para todos os nutrientes avaliados, destacando-se como geneticamente mais eficientes. Por outro lado, o clone 1013 teve os menores valores, exceto para o K (Tabela 17). Esses resultados corroboram os achados de Lima *et al.* (2005), que destacaram a variabilidade genética na absorção de nutrientes em espécies florestais.

Tabela 17 - Eficiência de absorção para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* e na fase de mudas.

Material Genético	P (mg g ⁻¹)	K (mg g ⁻¹)	Ca (mg g ⁻¹)	Mg (mg g ⁻¹)
K33	23,063	87,558	39,400	10,895
SI0520	24,591	123,552	74,576	17,646
1013	12,735	60,284	34,821	10,107
1014	30,434	160,075	126,127	30,804
1016	15,241	57,735	41,792	10,300
1017	17,564	74,998	38,799	13,638
1018	19,049	105,798	52,379	16,545
I-144	20,260	74,429	66,530	16,770

P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio.

3.3.3 Eficiência de Utilização (EU)

A eficiência de utilização (EU) apresentou padrões variados entre os clones, com o clone 1018 se destacando para a maioria dos nutrientes, especialmente P, Ca e Mg (Tabela 18). Essa variabilidade é consistente com os resultados de Martins *et al.* (2013), que atribuíram a EU à capacidade dos genótipos de produzir biomassa com menor teor de nutrientes nos tecidos. Por outro lado, clones como K33 e 1014 apresentaram menor EU para vários nutrientes, sugerindo maior dependência de suprimentos externos.

Tabela 18 - Eficiência de utilização para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144) na fase de mudas.

Material Genético	P (g ² g ⁻¹)	K (g ² g ⁻¹)	Ca (g ² g ⁻¹)	Mg (g ² g ⁻¹)
K33	110,708	29,160	64,802	234,342
SI0520	231,779	43,060	65,033	311,102
1013	214,040	66,122	69,921	248,265
1014	206,484	41,685	48,407	201,313
1016	196,848	53,373	72,463	306,026
1017	190,035	44,505	86,027	244,751
1018	362,474	61,010	150,806	398,209
I-144	246,723	63,734	72,549	279,535

P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio.

A alta EU observada no clone 1018 é especialmente relevante para programas de melhoramento genético, pois materiais com alta eficiência podem ser mais competitivos em condições de baixa fertilidade (HARIDASAN, 2008). Estudos como os de Barros *et al.* (1986) destacam que a seleção de genótipos eficientes pode melhorar significativamente a sustentabilidade da silvicultura em solos tropicais.

A eficiência de utilização para K em clones de *Corymbia* foi superior à relatada para clones de *Eucalyptus* (LIMA *et al.*, 2005), sugerindo maior capacidade de adaptação do gênero *Corymbia* às condições de câmara de crescimento. Essa eficiência é relevante em solos pobres, pois implica menor dependência de fertilizantes, reduzindo custos de produção e impactos ambientais (KULMANN *et al.*, 2021).

3.3.4 Eficiência de Translocação (ET)

A eficiência de translocação (ET) foi maior para Mg, seguido de Ca, K e P (Tabela 19). Clones como 1014 e 1017 apresentaram as maiores eficiências de translocação para a maioria dos nutrientes, destacando-se na redistribuição interna de nutrientes para sustentar o crescimento da parte aérea. Em contrapartida, clones como 1013 e K33 tiveram valores inferiores, sugerindo menor capacidade de redistribuição, o que pode limitar o crescimento em solos de baixa fertilidade (RODRIGUES, 2024).

A capacidade de translocação de nutrientes é um aspecto essencial para a adaptação de plantas a diferentes ambientes. Segundo Pinto *et al.* (2011), essa habilidade pode ser usada como critério para selecionar genótipos com maior potencial de produtividade em solos tropicais, que frequentemente apresentam limitações nutricionais.

Tabela 19 - Eficiência de translocação para os materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144) na fase de mudas.

Material Genético	P (g g ⁻¹)	K (g g ⁻¹)	Ca (g g ⁻¹)	Mg (g g ⁻¹)
K33	0,688	0,743	0,994	0,897
SI0520	0,861	0,951	0,822	0,921
1013	0,830	0,829	0,768	0,741
1014	0,933	0,967	0,888	0,965
1016	0,826	0,796	0,853	0,879
1017	0,833	0,844	0,922	0,971
1018	0,854	0,890	0,827	0,848
I-144	0,860	0,861	0,913	0,937

P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio.

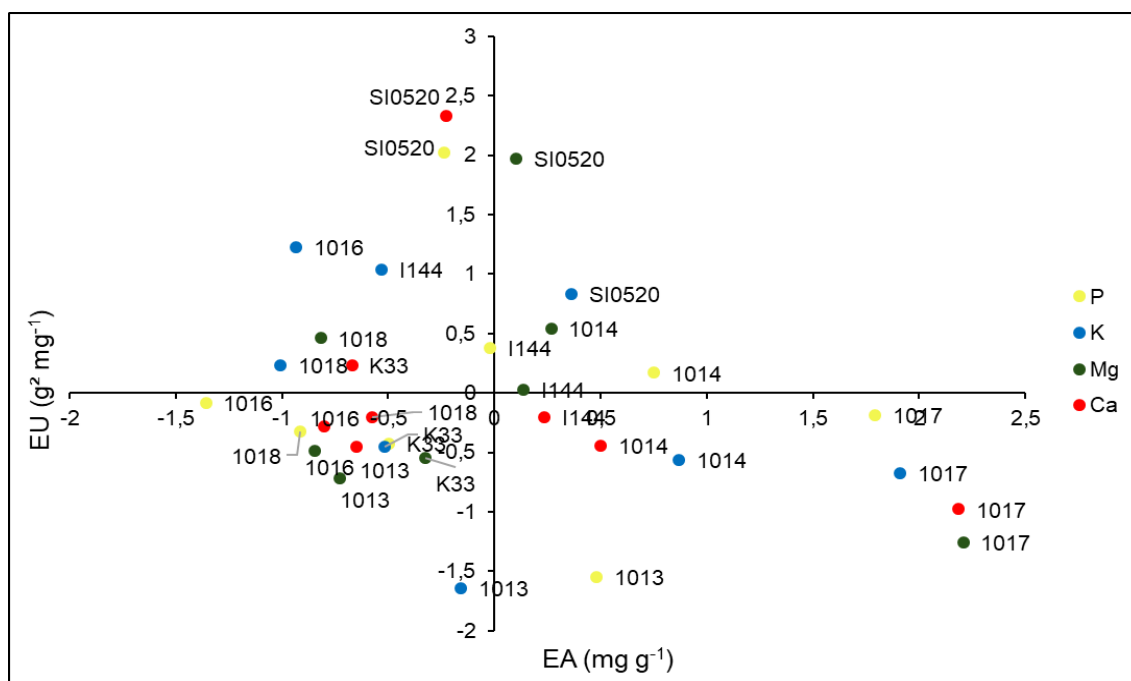
3.3.5 Integração entre Eficiência de Absorção e de Utilização

A dispersão dos materiais genéticos clonais de *Corymbia* estudados e do clone de *Eucalyptus* I-144 em quadrantes da relação entre os dois componentes da eficiência nutricional, ou seja, eficiência de absorção (EA) e eficiência de utilização (EU), para P, K, Ca e Mg, facilita a visualização integrada dos padrões apresentados pelos materiais genéticos (Figura 13). Nessa figura, os quadrantes estão identificados por código numérico a saber: em sentido anti-horário, onde o 1 (superior à direita) tem-se materiais genéticos com altas EA e EU; quadrante 2 (superior à esquerda) clones com alta EA e baixa EU; quadrante 3 (inferior à esquerda) materiais genéticos com baixas EA e EU; quadrante 4 (inferior à direita) clones com alta EA e baixa.

A relação entre a eficiência de absorção (EA) e a eficiência de utilização (EU) revelou padrões distintos entre os materiais genéticos avaliados. Clones como o SI0520 e o 1014 apresentaram alta EA e EU para dois nutrientes (K e Mg), refletindo maior capacidade de integração dos processos de absorção e utilização (Quadrante 1). No entanto, para os outros dois nutrientes, P e Ca esses clones exibiram padrões intermediários (Quadrante 2), pois apresentaram EA pouco abaixo da média, mas alta EU

Por outro lado, clones como o 1017 ficaram predominantemente no Quadrante 4, apresentando alta EA, mas baixa EU para todos os nutrientes. Essa característica pode ser vantajosa em ambientes ricos em nutrientes, mas limita a adaptação em solos pobres, como apontado por Chen *et al.* (2023). Clones como K33, 1013 e 1016, localizados no Quadrante 3 para três nutrientes, demonstraram baixa eficiência geral, o que os torna menos competitivos em condições de restrição nutricional.

Figura 13 - Relação entre eficiência de absorção (EA) (mg g^{-1}) e eficiência de utilização (EU) ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$) integrada para P, K, Ca e Mg para materiais genéticos clonais de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144), na fase de mudas.



3.3.6 Considerações Sobre a Eficiência Nutricional de Clones de *Corymbia*

Os resultados sobre eficiência nutricional destacam a relevância de avaliar parâmetros como EA, EU e ET na seleção de materiais genéticos para silvicultura em regiões tropicais. Clones como 1014 e 1018 emergem como altamente eficientes, sendo promissores para programas de melhoramento genético voltados à produtividade sustentável. Por outro lado, a variabilidade entre os clones evidencia a necessidade de considerar fatores genéticos e ambientais na definição de estratégias de manejo. A integração de genótipos

eficientes em sistemas de produção pode reduzir a dependência de fertilizantes e aumentar a resiliência das plantações a estresses ambientais.

3.3.7 Relações entre Variáveis Morfológicas, Fisiológicas e Nutricionais

Para avaliar a relação entre variáveis morfológicas, fisiológicas, e nutricionais, foi realizada análise multivariada, por componentes principais (PCA), que englobou, em conjunto, fotossíntese (*A*), eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) e transpiração (TR), EA, EU e ET para P, K, Ca e Mg, massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e raiz (MSR) e o IQD, que indica qualidade das mudas florestais

Com o modelo multivariado obtido com as variáveis supracitadas, tem-se que três CP's, em conjunto, explicam 86,99% da informação contida nos dados das variáveis mencionadas. Em acréscimo, quando analisadas apenas as CP 1 e 2, estas são capazes explicar 71,37% das relações, entre as variáveis (Tabela 20).

As duas variáveis que refletem a acumulação de carbono, ou seja, as massas de matéria seca da parte aérea e da raiz, foram significativas no CP1, com valor maior para a MSR (Tabela 20).

Em relação às variáveis relacionadas à eficiência nutricional, aquelas indicativas da eficiência de absorção de nutrientes não foram significativas na CP1, mas foram na CP2, exceto para a de P, a qual não foi significativa no CP2 (Tabela 20).

Tabela 20 - Coeficientes de Carga, AutoValores e Variância Explicada dos Componentes Principais da Análise Multivariada, para CP1, CP2 e CP3 para as variáveis A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD.

Contribuição das Variáveis			
Variável	CP1	CP2	CP3
A	0,0831	0,0001	0,0980
EIUA	0,0451	0,0317	0,1362
TR	0,0966	0,0066	0,0534
MSPA (g pl ⁻¹)	0,0707	0,0660	0,0055
MSR (g pla ⁻¹)	0,1132	0,0008	0,0035
EAP (mg g ⁻¹)	0,0559	0,0818	0,0339
EAK (mg g ⁻¹)	0,0324	0,1223	0,0007
EAMg (mg g ⁻¹)	0,0264	0,1433	0,0013
EACa (mg g ⁻¹)	0,0384	0,1270	0,0042
EUP (g ² g ⁻¹)	0,0671	0,0643	0,0308
EUK (g ² g ⁻¹)	0,0610	0,0005	0,1379
EUMg (g ² g ⁻¹)	0,0854	0,0077	0,0005
EUCa (g ² g ⁻¹)	0,0866	0,0044	0,0006
ETP (mg mg ⁻¹)	0,0006	0,1259	0,0625
ETK (mg mg ⁻¹)	0,0008	0,1636	0,0140
ETMg (mg mg ⁻¹)	0,0101	0,0463	0,1829
ETCa(mg mg ⁻¹)	0,0181	0,0052	0,2339
IQD	0,1087	0,0026	0,0001
AutoValor	7,544	5,302	2,813
Variância Explicada	41,91	29,46	15,63
AutoValor Cumulativo	7,544	12,846	15,659
Variância Explicada Cumulativa	41,91	71,37	86,99

As variáveis indicativas da eficiência de utilização de nutrientes foram significativas no CP1, exceto para a de K. Quanto às variáveis indicativas da eficiência de translocação (ET), todas foram significativas seja no CP2 para P (ETP) e K (ETK), seja no CP3 para Mg (ETMg) e de Ca (ETCa). Já a qualidade das mudas, por meio do Índice de Qualidade de Dickson foi o *loading* de segundo maior valor numérico no CP1 (Tabela 20).

Além disso, foram obtidas as contribuições das variáveis nos CP1, CP2 e CP3 e ponderada a sua contribuição em cada CP pela variância explicada. Além

disso, também foi obtida a contribuição das variáveis a partir do modelo multivariado (Tabela 21). Nessa tabela, vê-se, no CP2, que os grupos de variáveis com alta contribuição nesse CP foram as de eficiência de absorção e de translocação de nutrientes (no caso, para ETP e ETK). Já no CP3, as variáveis indicativas da translocação (ETCa e ETMg) foram as de maior contribuição.

A contribuição obtida dos grupos de variáveis no modelo multivariado com três (3) CP's seguiu a ordem: EA > ET > EU > fisiológicas > acumulação de carbono > qualidade das mudas. Deve-se considerar, contudo, que as variáveis relacionadas à acumulação de carbono são consequência das trocas gasosas. Logo, parece mais adequado somar as contribuições das fisiológicas (17,29%) com as de acumulação de carbono (11,28%), o que resulta na contribuição de 28,57%, ou seja, a maior contribuição no modelo multivariado.

Tabela 21 – Grupo de variáveis e componentes principais e suas devidas contribuições ao modelo multivariado.

Grupo de Variáveis	CP1	CP2	CP3	Modelo Multivariado
Contribuição (%)				
Variáveis Fisiológicas	22,47	3,83	28,76	17,29
Acumulação de Carbono	18,39	6,67	0,90	11,28
Eficiências de Absorção	15,32	47,44	4,02	24,17
Eficiências de Utilização	30,00	7,70	16,97	20,11
Eficiências de Translocação	2,95	34,10	49,33	21,83
Qualidade de Mudas	10,87	0,26	0,01	5,33

A contribuição dos materiais genéticos também foi obtida em cada CP e no modelo multivariado (Tabela 22). Nessa tabela, vê-se que os clones 1017, SI0520 e 1013, todos de *Corymbia*, foram os de maior contribuição no CP1, o componente mais informativo. O clone 1017 também, apresentou a maior contribuição no CP2, seguido pelo 1013 e pelo 1016, nessa ordem, considerando as três maiores contribuições no CP2.

No CP3, as maiores contribuições também são para clones de *Corymbia*, com destaque para o 1016. Cabe notar que, a contribuição do clone de

Eucalyptus I-144 foi muito baixa em todos os CP e no modelo multivariado como um todo.

Tabela 22 - Contribuição dos materiais genéticos de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144) para CP1, CP2, CP3 e modelo multivariado.

Material genético	CP1	CP2	CP3	Modelo Multivariado
1013	16,97	25,01	19,58	20,16
1014	0,18	8,48	1,46	3,22
1016	0,06	16,65	48,28	14,34
1017	40,81	29,85	4,65	30,60
1018	0,67	8,58	3,30	3,82
K33	3,77	0,49	20,00	5,57
SI0520	32,60	9,30	0,47	18,94
I-144	4,94	1,64	2,26	3,34
AutoValor	7,544	5,302	2,813	
Variância Explicada	41,91	29,46	15,63	
AutoValor Cumulativo	7,544	12,846	15,659	
Variância Explicada Cumulativa	41,91	71,37	86,99	

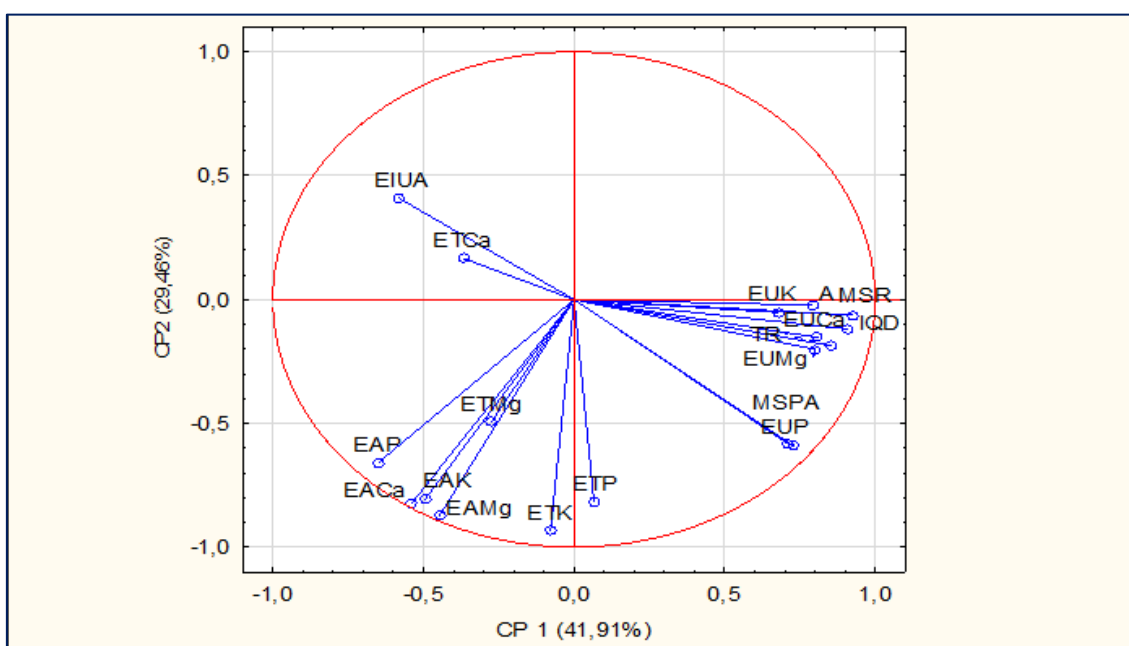
Cabe mencionar que, o CP4, apesar do AutoValor 1,172, não foi considerado no modelo multivariado devido à ausência das variáveis no valor de coeficiente de carga (*loading*) significativo, ou seja, maior ou igual a 0,707 (em valor absoluto), assim como os seguintes (Tabela 23).

Tabela 23 - Autovalores da matriz de correlação e estatísticas relacionadas para as 7 componentes principais.

CP	AutoValor	Variância Explicada	AutoValor Cumulativo	Variância Explicada Cumulativa
1	7,544	41,911	7,544	41,91
2	5,302	29,456	12,846	71,37
3	2,813	15,627	15,659	86,99
4	1,172	6,511	16,831	93,51
5	0,743	4,128	17,574	97,63
6	0,221	1,229	17,795	98,86
7	0,205	1,138	18,000	100,00

Além das informações obtidas anteriormente, foram obtidos gráficos de dispersão para CP2 vs CP1, ou seja, para os dois componentes principais que contém mais informação, perfazendo em conjunto 71,37% de toda a informação, tanto em nível das variáveis como também em nível dos clones (Figura 14).

Figura 14 - Dispersão das variáveis nos componentes principais (CP1) e (CP2) - A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD - da análise multivariada em mudas de materiais de *Corymbia* e de *Eucalyptus* (I-144).

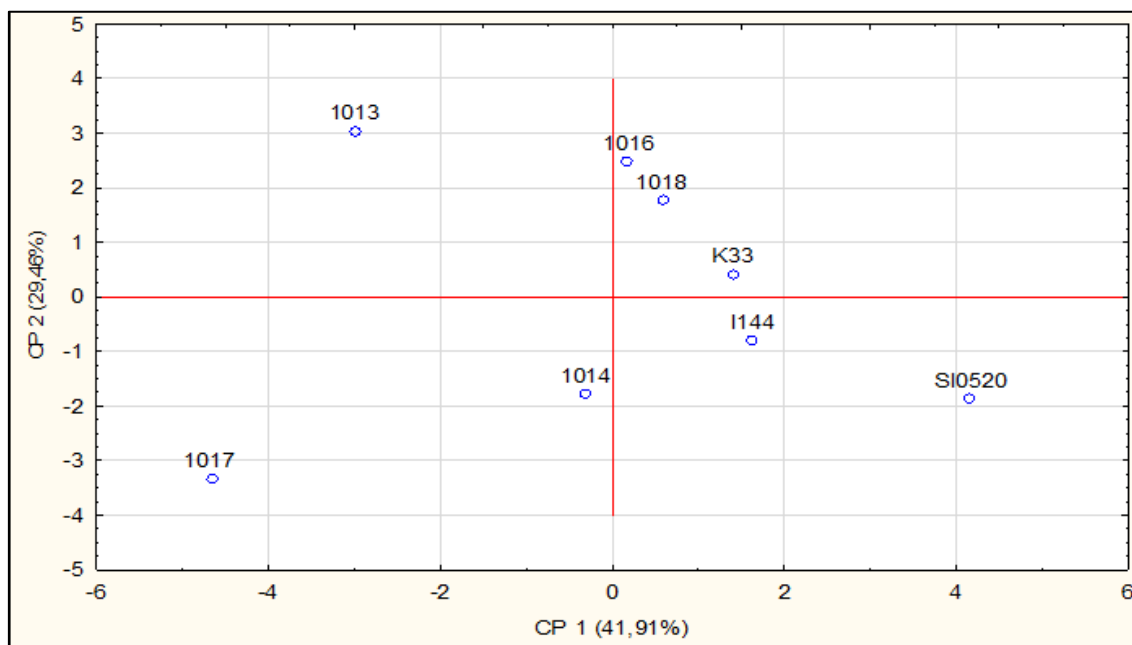


Os vetores apresentados indicam a contribuição de cada variável na relação entre as duas componentes principais. Nota-se que, os comprimentos dos vetores são semelhantes, assim como a direção coincide em diversas situações.

Seguindo o método dos quadrantes supracitado, foi apresentado na Figura 15 a dispersão dos parâmetros morfológicos, fisiológicos e nutricionais para os materiais genéticos de *Corymbia* e *Eucalyptus* (I-144) avaliados.

Com base no conjunto de variáveis da PCA e considerando CP1 e CP2, tem-se que os materiais genéticos 1017, 1013 e SI0520 são os que mais se distinguem. Em contrapartida, os materiais genéticos 1014, 1018 e K33, como também o material de *Eucalyptus* I-144, são mais próximos entre si.

Figura 15 - Dispersão dos materiais genéticos de *Corymbia* e em *Eucalyptus* (I-144) nos componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada- A, TR, EIUA, MSPA, MSR, EAP, EAK, EACa, EAMg, EUP, EUK, EUCa, EUMg, ETP, ETK, ETCa, ETMg e IQD - da análise multivariada.



3.7.1.1 Discussão e Síntese Conclusiva

3.7.1.1.1 Contribuições das Variáveis no Modelo Multivariado

A análise multivariada revelou que três componentes principais (CPs) foram suficientes para explicar 86,99% da variância total dos dados, indicando forte capacidade do modelo em sintetizar as relações entre as variáveis morfológicas, fisiológicas e nutricionais (Tabela 12). As duas primeiras componentes principais (CP1 e CP2) explicaram juntas 71,37% da variância, reforçando a relevância dessas dimensões na descrição do desempenho dos materiais genéticos.

O CP1 foi dominado pelas variáveis de acumulação de carbono, como massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR), com maior peso para esta última. Além disso, a eficiência de utilização de nutrientes (EU) apresentou alta contribuição no CP1, exceto para o potássio (K). Esses resultados destacam a

importância da biomassa acumulada e da eficiência no uso de nutrientes no desempenho inicial das mudas (CHEN *et al.*, 2023).

No CP2, as variáveis mais influentes foram relacionadas à eficiência de absorção (EA) e à translocação de nutrientes (ET). P e K apresentaram alta contribuição, refletindo sua relevância no metabolismo inicial das mudas. Por sua vez, o CP3 foi dominado pela translocação de Mg e Ca, evidenciando a importância da redistribuição interna desses nutrientes para o crescimento.

3.7.1.1.2 Contribuições dos Grupos de Variáveis

A contribuição dos grupos de variáveis no modelo multivariado seguiu a ordem: eficiências de absorção (EA) > eficiências de translocação (ET) > eficiências de utilização (EU) > variáveis fisiológicas > acumulação de carbono > qualidade das mudas (Tabela 13). Quando somadas as contribuições das variáveis fisiológicas e de acumulação de carbono, obtém-se a maior participação no modelo, evidenciando a interdependência entre trocas gasosas e produção de biomassa (GAO *et al.*, 2018).

As eficiências nutricionais, particularmente EA e ET, desempenharam papel crucial na discriminação entre os clones, corroborando estudos que destacam a importância desses parâmetros em programas de melhoramento genético para solos de baixa fertilidade (HARIDASAN, 2008; KULMANN *et al.*, 2021).

3.7.1.1.3 Contribuição dos Clones

Os clones 1017, SI0520 e 1013 apresentaram as maiores contribuições no CP1, com destaque para o clone 1017, que também teve a maior contribuição no CP2. Isso reflete a superioridade desses clones em termos de acumulação de biomassa e eficiência de absorção de nutrientes. No CP3, o clone 1016 destacou-se pela alta contribuição na translocação de nutrientes, especialmente Ca e Mg.

Por outro lado, o clone de *Eucalyptus* (I-144) apresentou baixa contribuição em todos os CPs, indicando desempenho inferior em relação aos clones de *Corymbia*. Esses resultados corroboram a literatura que aponta maior demanda nutricional de *Corymbia*, mas também maior potencial adaptativo em ambientes adversos (RODRIGUES *et al.*, 2024).

3.7.1.1.4 Dispersão nos Componentes Principais

A dispersão das variáveis e clones nos dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) revelou padrões claros de separação. Variáveis relacionadas à eficiência nutricional, como EA e ET, apresentaram vetores longos e direcionados, indicando forte influência na discriminação dos materiais genéticos. Clones como 1016 e 1018 destacaram-se por associações com altos valores de EU e ET, enquanto 1017 apresentou elevada EA.

3.7.1.1.5 Síntese Conclusiva

A integração de variáveis morfológicas, fisiológicas e nutricionais por meio da PCA forneceu *insights* valiosos sobre o desempenho de clones de *Corymbia*. Clones como 1017, SI0520 e 1016 emergem como promissores para programas de melhoramento genético, seja pelo alto desempenho fisiológico ou pela eficiência no uso de nutrientes. Em contraste, o clone de *Eucalyptus* I-144 mostrou limitações em relação aos clones de *Corymbia*, reforçando a necessidade de estratégias específicas para diferentes contextos ambientais.

4 CONCLUSÕES

A ampla variabilidade observada nas eficiências de uso de carbono e nutrientes entre os materiais genéticos indica o potencial de identificação de genótipos superiores, especialmente para sistemas de produção em solos ou meios de crescimento com limitações nutricionais.

Clones com maiores valores de IQD, também apresentaram as maiores taxas fotossintéticas e de trocas gasosas (A , g_s e Tr), o que reflete sua maior capacidade de produção de biomassa e qualidade de muda.

A variação das eficiências de absorção, utilização e translocação de macronutrientes entre os clones reforça a necessidade de considerar características nutricionais específicas para otimizar o manejo e o desempenho em diferentes condições de fertilidade do solo.

De maneira geral, os resultados deste trabalho fornecem subsídios importantes para programas de melhoramento genético, permitindo a seleção de clones de *Corymbia* spp. mais eficientes e adaptados a cenários variados de disponibilidade de recursos.

REFERÊNCIAS

ASSIS, L. B. et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp.* para uso industrial. *Ciência Florestal*, v. 31, p. 214-232, 2021.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: desafios e perspectivas. 3º Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3, 127-148, 2014.

ASSUNÇÃO, A. G. L. et al. Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *Journal of Experimental Botany*, v. 73, n. 6, p. 1789-1799, 2022.

ÁVILA, P. A. Aspectos morfofisiológicos da copa e do sistema radicular de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* com diferentes tolerâncias à deficiência hídrica. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

ÁVILA, R. T. Macronutrient dynamics in *Corymbia citriodora*: A case study. *Forest Nutrition Journal*, v. 45, n. 3, p. 123-135, 2020.

AWAD, M.; CASTRO, P. R. C. Introdução à fisiologia vegetal. São Paulo: Ed. Nobel, 1ª ed., 177 p., 2021.

BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais-Descrição de uma metodologia. *Revista Árvore*, v. 10, n. 1, p. 112-120, 1986.

BEHLING, M. et al. Relações entre parte aérea e raízes em povoamentos de teca. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 65, n. 6, p. 463-473, 2018.

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. (org.). Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF. p. 105-133, 2000.

BERNARDI, M. R. et al. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. *Cerne*, v. 18, p. 67-74, 2012.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*, v. 193, p. 5-16, 2021.

BINOTTO, A. F. et al. Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. *Cerne*, v. 16, n. 4, p. 457-464, 2010.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. Melhoramento de plantas. Oficina de Textos, 2021.

BRANDÃO FILHO, J. U. T. et al. Influência da enxertia nas trocas gasosas de dois híbridos de berinjela cultivados em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, v. 21, p. 474-477, 2003.

BRAWNER, J. T. et al. Relationships between early growth and Quambalaria shoot blight tolerance in *Corymbia citriodora* progeny trials established in Queensland, Australia. *Tree Genetics & Genomes*, v. 7, p. 759-772, 2011.

BRIAT, J. F.; DUBOS, C.; GAYMARD, F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science*, v. 25, n. 11, p. 1047-1060, 2020.

BROADLEY, M. R. et al. Magnesium as a critical element for crop production. *Plant Physiology*, v. 187, n. 4, p. 1245-1260, 2021.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. *New Phytologist*, v. 235, n. 3, p. 601-604, 2022.

BROWN, P. H. et al. Boron in plant biology. *Plant Biology*, v. 28, n. 2, p. 205-223, 2002.

BURRIDGE, J. D. et al. Optimizing crop water use for drought and climate change adaptation requires a multi-scale approach. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, p. 824720, 2022.
CALDEIRA, M. V. W. et al. Eficiência do uso de micronutrientes e sódio em três procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 39-47, 2004.

CAO, G.-X.; WORLEY, A. C. Life history trade-offs and evidence for hierarchical resource allocation in two monocarpic perennials. *Plant Biology*, v. 15, n. 1, p. 158-165, 2013.

CARNEIRO, J. G. A. Produção e controle de qualidade de mudas florestais. Curitiba: Campos; UENF; UFPR; FUPEF, 451 p, 1995.

CASTRO, C. E. C. D. Adaptabilidade, estabilidade, eficiência nutricional e do uso da água em famílias de polinização aberta de *Eucalyptus grandis*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, 2017.

CHEN, X. et al. Divergent leaf nutrient-use strategies of coexistent evergreen and deciduous trees in a subtropical forest. *Journal of Plant Ecology*, v. 16, n. 4, rtac093, 2023.

CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 23, n. 3, p. 458-460, 1975.

CUNHA, A. C. M. C. M. D. et al. Influência do estado nutricional de minicepas no enraizamento de miniestacas de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 33, p. 607-615, 2009.

DAY, S.; AASIM, M. Role of boron in growth and development of plant: Deficiency and toxicity perspective. In: AFTAB, T.; HAKEEM, K. R. (eds.). *Plant Micronutrients: Deficiency and Toxicity Management*. p. 435-453, 2020.

DIANESE, J. C.; MORAES, T. D. A.; SILVA, A. R. Screening *Eucalyptus* species for rust resistance in Bahia, Brazil. *International Journal of Pest Management*, v. 32, n. 4, p. 292-295, 1986.

DICKINSON, G. R. et al. The influence of pre-and post-zygotic barriers on interspecific *Corymbia* hybridization. *Annals of Botany*, v. 109, n. 7, p. 1215-1226, 2012.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forest Chronicle*, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FERNANDES, E. T. et al. Respostas fisiológicas de clones de *eucalipto* cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. *Ciência Rural*, v. 45, p. 29-34, 2015.

FERNANDES, L. V. et al. Omission and resupply of nitrogen affect physiological and enzymatic activities and the gene expression of *eucalypt* clones. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, 2016.

GAO, Z.; SHEN, W.; CHEN, G. Uncovering C4-like photosynthesis has important functions in C3 plant vasculature. *Journal of Experimental Botany*, v. 69, n. 15, p. 3531-3540, 2018.

GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LANCHLI, A. (eds.). *Advances in Plant Nutrition*. New York: Praeger Publishers, p. 57-102, 1984.

HANSEN, E. A.; BAKER, J. B. Biomass and nutrient removal in short rotation intensively cultured plantations. In: *ANNUAL MEETING AMERICAN POPLARS COUNCIL*. Thompsonville, p. 130-151, 1979.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 20, p. 183-195, 2008.

HAWKESFORD, M. J. et al. Nutrient use efficiency in plants: concepts and approaches. Springer Science & Business Media, 2020.

HILL, K. D.; JOHNSON, L. A. S. Systematic studies in the eucalypts 7. A revision of the bloodwoods, genus *Corymbia* (Myrtaceae). *Telopea*, v. 6, p. 185-504, 1995.

HUBER, D. M.; JONES, J. B. The role of magnesium in plant disease. *Plant and Soil*, v. 368, p. 73-85, 2013.

INOUE, M. T.; RIBEIRO, F. A. Fotossíntese e transpiração de clones de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. *IPEF*, n. 40, p. 15-20, 1988.

IOSSAQUI, C. G. Qualidade de mudas de *Corymbia citriodora* em diferentes frequências de fertirrigações. 2024. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina.

KHOSHGOFTARMANESH, A. H. et al. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, n. 1, p. 83-107, 2010.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. Water relations of plants and soils. Academic Press, 1995.

KULMANN, S. S. M. et al. Morphological and kinetic parameters of the absorption of nitrogen forms for selection of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, v. 32, p. 1599-1611, 2021.

LAMBERS, H. et al. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 23, n. 2, p. 95-103, 2008.

LAMBERS, H. Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annual Review of Plant Biology*, v. 73, n. 1, p. 17-42, 2022.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. *Plant physiological ecology*. Springer Science & Business Media, 2008.

LAMBERS, H.; POORTER, H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. *Advances in Ecological Research*, n. 64, p. 283-362, 2020.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. 3. ed. São Carlos: Rima, 531 p., 2004.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand 2: Development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. *Australian Forestry*, v. 70, n. 1, p. 11-16, 2007.

LI, B.; McKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *Forest Science*, v. 37, n. 2, p. 613-626, 1991.

LIMA, A. M. N. et al. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 903-909, 2005.

LIMA, P. R. et al. Photosynthetic responses of *Eucalyptus* seedlings submitted to chemical and mechanical stimulus. *Ciência Florestal*, v. 29, p. 740-753, 2019.

LIMA, R. L. et al. Efficiency of nutrient utilization in *Eucalyptus* clones. *Scientia Forestalis*, v. 37, n. 3, p. 5-58, 2005.

LIMA, W. P. Impactos da cultura do eucalipto. *Revista Silvicultura*, n. 64, p. 32-8, 1995.

LIU, Z. et al. Divergent response and adaptation of specific leaf area to environmental change at different spatio-temporal scales jointly improve plant survival. *Global Change Biology*, 1 fev. 2023.

LOCATELLI, M. et al. Efeito de formas de nitrogênio sobre o crescimento e composição mineral de mudas de *eucalipto*. *Agrotrópica*, v. 8, n. 1, p. 53-69, 1984.

LU, Z. et al. Nutrition-mediated cell and tissue-level anatomy triggers the covariation of leaf photosynthesis and leaf mass per area. *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 20, p. 6524-6537, 2020.

MANFIO, C. E. et al. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, n. 69, p. 63-68, 2012.

MARENCO, R. A. et al. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. *Revista Ceres*, v. 61, p. 786-799, 2014.

MARTÍNEZ-PEÑA, R. et al. Sulfur nutrition and leaf development in agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, p. 45-58, 2024.

MARTINS, M. F. et al. Nutrient translocation in tropical tree species. *Forest Science and Ecology*, v. 65, n. 5, p. 98-110, 2013.

MORAIS, E. et al. Variação genética, interação genótipo solo e ganhos na seleção em teste de progênies de *Corymbia citriodora* Hook em Luiz Antônio, São Paulo. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, p. 11-18, 2010.

MULLER, B. et al. Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 6, p. 1715-1729, 2011.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: EMBRAPA-SEA, 392 p. 189-253, 1991.

OLIVEIRA, L. F. et al. Quality indices for *Corymbia citriodora* seedlings: A comparative study. *New Forests*, v. 54, n. 2, p. 456-467, 2023.

OTTO, M. S. G. et al. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. *Revista Árvore*, v. 37, p. 431-439, 2013.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 117, n. 2, p. 239-242, 1992.

PEIXOTO, C. P.; PEIXOTO, M. F. S. P. Dinâmica do crescimento vegetal: princípios básicos. *Tópicos em Ciências Agrárias*, v. 38, 2009.

PINTO, J. R. et al. Nutrient absorption and allocation in *Eucalyptus* hybrids. *Brazilian Journal of Forest Research*, v. 29, n. 2, p. 112-122, 2011.

PINTO, S. I. D. C. et al. Root Morphology and Joint Uptake Kinetics of Phosphorus, Potassium, Calcium and Magnesium in Six *Eucalyptus* Clones. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 52, n. 1, p. 45-57, 2021.

PINTO, S. I. D. C. et al. Eficiência nutricional de clones de *eucalipto* na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 523-533, 2011.

POORTER, H. et al. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytologist*, v. 182, n. 3, p. 565-588, 2009.

PORTELA, R. C. Q. et al. Crescimento inicial de mudas de *Clitoria fairchildiana* Howard e *Peltophorum dubium* (Spreng) Taub em diferentes condições de sombreamento. *Ciência Florestal*, v. 11, n. 2, p. 163-170, 2001.

POZZA, A. A. A. et al. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1705-1714, 2009.

RABELO, L. K. L. et al. Cenário das árvores plantadas no Brasil. *Biodiversidade*, v. 19, n. 3, p. 170-179, 2020.

REIS, C. A. F. et al. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. 2013.

RODRIGUES, A. C. et al. Assessing adaptation and productivity: exploring the influence of water deficit on aboveground biomass and nutrient stocks in *Eucalyptus* and *Corymbia* species. *SSRN Electronic Journal*, 2024.

ROSOLEM, C. A.; HUSTED, S. Nutrient use efficiency: science to field practice. *Plant and Soil*, v. 496, p. 1-6, 2024.

ROZANE, D. E. et al. Eficiência de absorção, transporte e utilização de macronutrientes por porta-enxertos de caramboleira, cultivados em soluções nutritivas. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1020-1026, 2007.

RYAN, M. G. et al. 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.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 13, n. 4, p. 905-927, 2013.

SANTANA, R. C. et al. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore*, v. 26, p. 447-457, 2002.

SANTANA, R. C. et al. Alocação de nutrientes em plantios de *eucalipto* no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2723-2733, 2008.

SANTOS Jr., U. M.; GONÇALVES, J. F. C. Crescimento, concentração de nutrientes foliares e eficiência do uso de nutrientes fotossintéticos em espécies arbóreas tropicais plantadas em áreas degradadas na Amazônia Central. *Forest Ecology and Management*, v. 226, p. 299-309, 2006.

SANTOS, A. R. et al. Relationship between morphological parameters and field stability in forest seedlings. *Annals of Forest Science*, v. 77, n. 3, p. 78-90, 2020.

SANTOS, R. L. Influência do microclima nas trocas gasosas e na produção de estacas em jardim clonal de *Eucalyptus spp.* e *Corymbia spp.* 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019.

SCHREIBER, U.; BILGER, W.; NEUBAUER, C. Chlorophyll fluorescence as a non-intrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. In: SCHULZE, E.-D.; CALDWELL, M. M. (ed.). *Ecophysiology of Photosynthesis*. p. 49-70. Springer-Verlag, Berlin, 1994.

SCOLFORO, J. R. O mundo do eucalipto: os fatos e mitos de sua cultura. Rio de Janeiro: Mar de Ideias, 2008.

SHARMA, N. et al. Photosystems under high light stress: throwing light on the mechanism of photoinhibition and photoprotection. *Photosynthetica*, v. 61, n. 2, p. 250-263, 2023.

SHIPLEY, B.; VILE, D.; GARNIER, É. From plant traits to plant communities: A statistical mechanistic approach to biodiversity. *Science*, v. 314, n. 5800, p. 812-814, 2006.

SILVA, A. A.; SILVA, J. F. Tópicos em manejo de plantas daninhas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, p. 189-248, 2007.

SILVA, O. R. et al. Desempenho fotossintético e trocas gasosas de genótipos de *eucalipto* na fase inicial de desenvolvimento sob déficit hídrico. *Advances in Forestry Science*, v. 10, n. 2, 2023.

SILVA, P. H. M. D. et al. Balanço nutricional, produção de óleo essencial e madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson com aplicação de lodo de esgoto e fertilizante mineral. *Ciência Florestal*, v. 22, p. 835-845, 2012.

SILVA, P. H. M. et al. Seedling growth and physiological responses of sixteen *Eucalypt* taxa under controlled water regime. *Forests*, v. 9, n. 12, p. 759, 2018.

SMITH, T. E. Tree form and the roles of boron and calcium in hardwoods. *Corymbia Research*, v. 13, 2005.

SOARES, M. T. S. et al. Eucalipto: desafios para a pesquisa em nutrição, na ótica da sustentabilidade florestal. 2021.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; GOMES, A. N. Water use, water limitation, and water use efficiency in *Eucalyptus* plantation. *Bosque*, Valdivia, v. 25, p. 35-41, 2004.

STURION, J. A.; ANTUNES, J. B. M. Produção de mudas de espécies florestais. In: GALVÃO, A. P. M. (org.). *Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais*. Brasília: EMBRAPA, p. 125-250, 2000.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. *Journal of Plant Nutrition*, Monticello, v. 7, n. 10, p. 1687-1699, 1994.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Fotossíntese em *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. *Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG*, v. 23, n. 4, p. 336-345, 2015.

TONINI, H. et al. Biomassa e área foliar de clones de *eucalipto* em ILPF: implicações para a desrama. *Nativa*, v. 4, n. 5, p. 271–276, 2016.

TRIPLER, C. E. et al. Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters*, v. 9, n. 4, p. 451-466, 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. Departamento de Engenharia Agrícola. Estação Climatológica Principal de Viçosa. *Boletim Meteorológico*, 2016. Viçosa, 2016.

VITOUSEK, P. Nutrient cycling and use efficiency. *The American Naturalist*, v. 119, p. 553-572, 1982.

WANG, Y. et al. Phosphate uptake and transport in plants: an elaborate regulatory system. *Plant and Cell Physiology*, v. 62, n. 4, p. 564-577, 2021.

WENDLING, I.; FERRARI, M. P.; DUTRA, L. F. Produção de mudas de corticeira-do-mato por miniestaquia a partir de propágulos juvenis. Colombo: EMBRAPA Florestas, 5 p., 2005.

WENDLING, M. et al. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant and Soil*, v. 409, p. 419-434, 2016.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plants. *Annals of Botany*, v. 127, n. 4, p. 487-511, 2003.

XIE, Q. et al. Variation in adaptation and growth among *Corymbia citriodora* natural-stand and landrace seed sources in southern China. *Australian Forestry*, v. 80, n. 1, p. 60-69, 2024.

ZHANG, L. et al. Forest water-use efficiency: effects of climate change and management. *Forestry Research*, v. 2, n. 5, p. 75-90, 2023.