

**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI**

**Programa de Pós Graduação Ciência Florestal**

**Laís Grazielle Silva**

**DIAGNOSE DA COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DE POVOAMENTOS CLONAIS  
DE EUCALIPTO PELO MÉTODO CND**

**Diamantina  
2022**

Laís Grazielle Silva

**DIAGNOSE DA COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DE POVOAMENTOS CLONAIS  
DE EUCALIPTO PELO MÉTODO CND**

Tese apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Recursos Florestais, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana  
Coorientador: Prof. Dr. Júlio César Lima Neves

Diamantina

2022

### Catálogo na fonte - Sisbi/UFVJM

S586d Silva, Laís Grazielle  
2023      Diagnose da composição nutricional de povoamentos clonais  
de eucalipto pelo método CND [manuscrito] / Laís Grazielle  
Silva. -- Diamantina, 2023.  
99 p.

Orientador: Prof. Reynaldo Campos Santana.  
Coorientador: Prof. Júlio César Lima Neves.

Tese (Doutorado em Ciência Florestal) -- Universidade  
Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Programa de Pós-  
Graduação em Ciência Florestal, Diamantina, 2022.

1. Análise foliar. 2. Eucalyptus. 3. Nutrição florestal.  
4. Silvicultura. I. Santana, Reynaldo Campos. II. Neves,  
Júlio César Lima. III. Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri. IV. Título.


Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFVJM com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Este produto é resultado do trabalho conjunto entre o bibliotecário Rodrigo Martins Cruz/CRB6-  
2886  
e a equipe do setor Portal/Diretoria de Comunicação Social da UFVJM

**Diagnose da composição nutricional de povoamentos clonais de eucalipto pelo método CND**


Tese apresentada ao DOUTORADO EM CIÊNCIA FLORESTAL, nível de DOUTORADO como parte dos requisitos para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIA FLORESTAL

Orientador (a): Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana

Data da aprovação : 06/12/2022


Documento assinado digitalmente  
 REYNALDO CAMPOS SANTANA  
Data: 06/12/2022 15:21:32-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.Dr. REYNALDO CAMPOS SANTANA - UFVJM

Documento assinado digitalmente  
 JULIO CESAR LIMA NEVES  
Data: 07/12/2022 09:46:58-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>


Prof.Dr. JULIO CESAR LIMA NEVES - UFV

Prof.Dr. HELIO GARCIA LEITE - UFV


Documento assinado digitalmente  
 REINALDO BERTOLA CANTARUTTI  
Data: 07/12/2022 10:25:28-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.Dr. REINALDO BERTOLA CANTARUTTI - UFV

Prof.Dr. LAFAYETE GONCALVES CAMPELO MARTINS - FEAD

Documento assinado digitalmente  
 LAFAYETE GONCALVES CAMPELO MARTINS  
Data: 07/12/2022 16:14:27-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

DIAMANTINA

Documento assinado digitalmente  
 HELIO GARCIA LEITE  
Data: 07/12/2022 18:21:01-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

**DEDICO**

Aos meus saudosos e inesquecíveis Tios, Inhá e Cinéias, pelo amor, acolhida e exemplo de vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da Vida, pela saúde, sabedoria, persistência e Fé na busca dos meus objetivos.

A minha saudosa avó Nair (*in memoriam*) que está sempre no meu coração e que nas minhas orações sinto sua presença me dando força para cada conquista.

Aos meus pais, Lurdinha e Taquinho, pelo amor incondicional, pela torcida, por todo incentivo, e por estarem sempre ali, fazendo dos meus sonhos os deles. Ver os olhos de vocês brilharem a cada etapa da minha vida vencida é o meu combustível para continuar em busca dos meus sonhos.

A minha irmã Letícia, pelo amor, amizade e companheirismo de sempre em todos os momentos.

À toda minha família, tios (as), primos (as) e afilhados (as), pelo incentivo e amor imensurável.

Ao meu orientador, Prof. Reynaldo Campos Santana, que durante todos esses anos, praticamente uma década, transmitiu com muita sabedoria e paciência todo o seu conhecimento e experiência na área da silvicultura. Se eu cheguei onde cheguei, o senhor foi um dos responsáveis.

Ao meu coorientador Prof. Júlio César Lima Neves, por todo conhecimento transmitido com tanta leveza e expertise para a execução deste trabalho, foi um prazer trabalhar com o senhor.

Aos meus queridos professores, por todo ensinamento e experiência transmitidos e por sempre terem me tratado com tanto carinho e amizade durante todos esses anos de UFVJM, vocês sempre serão meu maior exemplo. Agradeço, particularmente, ao Prof. Marcio por toda atenção e disponibilidade em me auxiliar durante todo esse período de Pós-Graduação.

À UFVJM, em especial, ao Departamento de Engenharia Florestal, pela estrutura e, principalmente, por terem me acolhido com todo carinho todos esses anos como aluna e, em uma parte deles, como professora.

À UFV-*Campus Florestal*, principalmente ao Instituto de Ciências Agrárias e aos amigos do setor de silvicultura Viana, Macinho e Danilo pelo apoio, compreensão, auxílio e amizade durante todo esse tempo de treinamento.

Aos meus queridos alunos pelo carinho, paciência, aprendizado e momentos de descontração.

Às minhas inesquecíveis e duradouras amizades de Diamantina, Sete Lagoas e Florestal, por tantas vezes serem meu refúgio nos momentos de desespero, vocês são essenciais na minha vida.

Aos membros da banca de defesa, os professores Hélio, Reinaldo e Lafayette pela disponibilidade e pelas contribuições valiosas para a versão final deste trabalho.

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

## RESUMO

O monitoramento nutricional em plantios de eucalipto por meio da análise foliar subsidia ajustes no manejo nutricional para manter e/ou alcançar maiores produtividades. Dentre os métodos de interpretação da análise foliar destaca-se a Diagnose da Composição Nutricional (CND). O CND é uma expansão multivariada dos métodos univariados e bivariados que pode resultar em diagnósticos mais precisos e expressar o grau de equilíbrio nutricional da cultura, por considerar a interação entre todos os nutrientes. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do método CND na diagnose nutricional de plantios clonais de eucalipto. O banco de dados foi composto de teores foliares de macro e micronutrientes e crescimento de plantios de eucalipto, compreendidos por diferentes genótipos e idades (de 0,4 a 72 meses). Estes, foram coletados de diversas empresas e situados em várias localidades do país. A população de referência foi obtida com base na abordagem da linha de fronteira superior do relacionamento entre o crescimento em altura em função da idade. As normas CND foram obtidas a partir desta população. Posteriormente, foram obtidos os índices CND e os nutrientes foram ordenados quanto ao grau de limitação nutricional de acordo com o potencial de resposta à adubação (PRA). Os índices CND também foram relacionados com o crescimento relativo em altura (CRH) e com o crescimento relativo em volume (CRV). Posteriormente, a região de fronteira superior destes relacionamentos foi utilizada para gerar as curvas de resposta potencial nutrientes específicas (CRPNE). Estas, foram ajustadas através de dois modelos: o polinomial de 2º grau e a regressão duplo linear com resposta platô (RDLP) a fim de comparar quais dos modelos se ajustariam melhor aos dados. A partir das CRPNE foram obtidas as faixas de suficiência (FSU) para os índices CND, utilizando tanto as equações ajustadas pelo modelo polinomial de 2º grau quanto as ajustadas pela RDLP. A diagnose nutricional dos plantios de eucalipto também foi realizada considerando as FSU. O estabelecimento de normas CND utilizando a população de alta produtividade estabelecida pela linha de fronteira demonstrou ser apropriada para a maioria dos nutrientes. As normas CND obtidas para macro e micronutriente, foram precisas para todos os nutrientes, exceto para P, Mn e S. A sequência de limitação por falta dos nutrientes dada pelo PRA foi  $Cu > Mg = S > Fe = Mn > Ca > Zn = B > N > P = K$ . As CRPNE foram explicativas, sendo que aquelas obtidas pela RDLP se ajustaram melhor ao relacionamento entre os índices CND e o CRH e o CRV. As FSU obtidas para o CND são assimétricas quanto aos seus limites e apresentaram intervalos bem amplos. Estas,

foram adequadas para avaliar o status nutricional de povoamentos clonais de eucalipto e demonstraram que a maioria dos talhões avaliados enquadraram-se na classe normal.

**Palavras chave:** Análise foliar, *Eucalyptus*, Nutrição florestal, Silvicultura.

## ABSTRACT

Nutritional monitoring in eucalyptus plantations using leaf analysis is an important tool for adjustments in nutritional management in order to maintain and/or achieve greater yields. The Compositional Nutrient Diagnosis (CND) is one of the main methods for interpretation of leaf analysis. The CND is a multivariate extension of univariate and bivariate methods that can result in more accurate diagnoses, besides providing the degree of nutritional balance in the plantation, since it considers the interaction between all the nutrients. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the CND method for the nutritional diagnosis of eucalyptus in clonal plantations. The data base was composed of foliar levels of macro and micronutrients and growth indicators for different genotypes and ages (from 0.4 to 72 months) of eucalyptus plantations. Such data were collected from several companies and located across multiple locations in Brazil. The reference population was obtained based on the upper border line approach of the relationship between increase in height as a function of age. CND norms were obtained from this population. Further, the CND indices were estimated and the nutrients were ordered according to the degree of nutritional limitation according to the potential response to fertilization. CND indices were also related to relative increase in height (CRH) and relative increase in volume (CRV). As the next step, the upper border region of these relations was used to generate potential nutrient-specific potential response curves (CRPNE). The CRPNE were adjusted using two models: the 2nd degree polynomial and the double linear regression with plateau response (RDLP) in order to compare which of the models would best fit the data. From the CRPNE, the sufficiency ranges (FSU) for the CND indices were obtained, using both the equations adjusted by the 2nd degree polynomial model and those adjusted by the RDLP. The nutritional diagnosis of eucalyptus plantations were also carried out considering the FSU. Setting CND norms using the greater-yield population across the boundary line has been shown to be appropriate for most nutrients. The CND norms obtained for macro and micronutrients were accurate for all nutrients, except for P, Mn and S. According to the PRA, the nutrients most limiting the eucalyptus yield was  $Cu > Mg = S > Fe = Mn > Ca > Zn = B > N > P = K$ , respectively. The CRPNE were explanatory, and those obtained by the RDLP fitted better to the relation among the CND indices and the CRH and CRV. The FSU obtained for the CND are asymmetric in terms of their limits and showed spacious intervals. These were suitable for assessing the nutritional status of eucalyptus clonal plantations and demonstrated that most of the evaluated plots fits in the normal class.

**Keywords:** Leaf analysis, Eucalyptus, Forest nutrition, Silviculture.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 9  |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO .....  | 12 |
| 2.1. Origem e Conceito do CND.....  | 12 |
| 2.2. Aplicações do CND .....  | 14 |
| 2.3. População de referência .....  | 17 |
| 2.4. Formação do banco de dados.....  | 20 |
| 2.5. Estabelecimento das normas CND .....   | 24 |
| 2.6. Cálculos CND.....  | 26 |
| 2.6.1. Variáveis multinutrientes.....   | 26 |
| 2.6.2. Índices CND .....  | 29 |
| 2.7. Interpretação dos índices CND .....  | 30 |
| 2.8. Vantagens do CND .....   | 36 |
| 2.9. Considerações finais .....   | 37 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....   | 39 |
| 3.1. Área de estudo e formação do banco de dados.....                               | 39 |
| 3.2. Estabelecimento da população de referência .....                               | 40 |
| 3.3. Produtividade das árvores .....  | 41 |
| 3.4. Cálculo das Normas CND.....  | 43 |
| 3.5. Cálculo dos Índices CND .....  | 44 |
| 3.6. Diagnose Nutricional e Potencial de Resposta à Adubação .....                  | 45 |
| 3.7. Curvas de Resposta Potencial Nutrientes Específicas .....                      | 46 |
| 3.8. Análises computacionais.....   | 47 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 48 |
| 4.1. Estabelecimento da população de fronteira .....                                | 48 |
| 4.2. Crescimento das árvores .....  | 49 |
| 4.3. Normas CND .....   | 50 |
| 4.4. Diagnose nutricional e Potencial de resposta à adubação.....                   | 56 |
| 4.5. Curvas de resposta potencial nutrientes específicas .....                      | 63 |
| 4.6. Faixas de Suficiência .....  | 78 |
| 4.7. Diagnósticos dos plantios de eucalipto com base nas faixas de suficiência..... | 83 |
| 5. CONCLUSÕES.....  | 87 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 88 |

## 1. INTRODUÇÃO

Ganhos em produtividade dos plantios com eucalipto no Brasil têm sido observados nas últimas décadas, onde, a produtividade média passou de  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na década de 60 (GONÇALVES et al., 2008) para  $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  nos dias atuais (IBÁ, 2022). Várias são as razões que explicam esse aumento. Uma delas é o uso de fertilizantes nas fases de estabelecimento e manutenção da floresta, uma vez que, grande parte desses plantios é estabelecida em regiões com déficit hídrico e nutricional. Diversos estudos têm demonstrado resposta a fertilização em povoamentos com eucalipto (FERREIRA e STAPE et al., 2010; PULITO et al., 2015; SILVA et al., 2016, SILVA et al., 2019; 2022). No entanto, a magnitude de resposta depende entre outros fatores das necessidades nutricionais do genótipo e da disponibilidade de nutrientes no solo (GONÇALVES et al., 2013) e, com isso, os ganhos em produtividade resultantes da aplicação de fertilizantes minerais podem variar em média de 30 a 50% (GONÇALVES, 2011).

Uma das formas de conhecer as necessidades nutricionais do genótipo e a fertilidade do solo é através do monitoramento e estudo nutricional. Este, por sua vez, pode ser realizado em todas as épocas de estabelecimento da floresta a fim de avaliar o estado nutricional das plantas e identificar os nutrientes que estariam limitando o crescimento e a produção das culturas, sejam eles limitantes por falta ou excesso (FAQUIN, 2002). Além disso, o monitoramento nutricional permite avaliar se o manejo da fertilização adotado foi adequado e/ou subsidiar ajustes no manejo nutricional objetivando-se alcançar maiores produtividades.

Os programas de monitoramento nutricional adotados pela maioria dos produtores florestais consistem em coletar amostras de tecidos da planta, em diferentes idades, que são levadas para laboratório, onde são determinados os teores dos nutrientes nesses tecidos. Wadt (1996) recomenda que para plantios adultos de eucalipto o uso de toda a parte aérea (folhas, casca, galhos e lenho) seria o ideal, pois refletiriam melhor o estado nutricional da árvore em todo o seu ciclo de vida. Entretanto, a análise nutricional poderia se tornar inviável levando em consideração questões tanto financeiras quanto operacionais. Nesse sentido, as folhas é a parte mais utilizada para a diagnose nutricional dos plantios florestais e para a maioria das outras culturas, até porque, é o órgão fisiologicamente mais ativo, responsável pela produção de assimilados, além de apresentar maior correlação entre os teores dos nutrientes e a produtividade das culturas (SILVA, 2001; CANTARUTTI et al., 2007).

Vários são os métodos ou procedimentos empregados para interpretar os resultados da análise foliar. Dentre eles, destaca-se a Diagnose da Composição Nutricional (CND). Proposto por Parent e Dafir (1992), pode-se considerar que o CND é um método recentemente desenvolvido com o objetivo de melhorar e aprimorar os diagnósticos realizados por métodos mais convencionais como o do nível crítico (NC) e o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS). Baseado na teoria da Análise de Dados Composicional de Aitchison (1982), o CND reconhece que há uma estrutura de dependência entre os nutrientes das plantas, em que, a ocorrência de uma mudança em certas proporções de nutrientes no tecido, provoca alterações em suas outras proporções, uma vez que a composição da planta é restrita a 100% do teor da matéria seca (PARENT et al., 1993). Assim, este método leva em consideração todos os nutrientes envolvidos na análise e também aqueles não envolvidos, visto que, ele calcula um valor de complemento R, para que o somatório dos teores de todos os nutrientes em diagnose mais R seja igual a 1,0 ou a 100%.

Por considerar a interação entre todos os nutrientes, o CND é uma expansão multivariada dos métodos univariados (NC) e bivariados (DRIS). Diante disso, o seu uso na avaliação do estado nutricional de povoamentos florestais pode resultar em diagnósticos mais precisos, pois, de acordo com Holland (1966) à medida que aumenta o número de nutrientes que são analisados simultaneamente, a consistência do diagnóstico aumenta, principalmente se o método envolver todos os nutrientes. Ademais, ao considerar a interação entre os nutrientes, o CND, assim como o DRIS, traz informações sobre o grau de equilíbrio nutricional da cultura, enquanto os métodos univariados avaliam apenas o grau de balanço.

O monitoramento nutricional em plantios de eucalipto por meio da análise foliar tem ganhado merecida atenção das empresas florestais nos últimos anos. Isto porque, estas análises, quando corretamente interpretadas, resultam em informações complementares relacionadas a fertilidade do solo e a demanda da planta, que auxiliam na melhoria dos programas de fertilização das mesmas. Ao longo dos anos, vários estudos tem sido realizados utilizando diferentes metodologias para interpretação da análise foliar de povoamentos de eucalipto como o NC (WADT, 2004; SGARBI, 2002; MORAIS et al., 2019), Índices balanceados de Kenworthy (KW) (CUNHA, FERNANDES, 2010; BORGES, 2012; GALDINO, 2015) e DRIS (WADT et al., 1998ab, WADT et al., 1999; SILVA et al., 2004, 2005; CAMPION e SCHOLE, 2007; ROCHA, 2020) e poucos são os estudos que realizaram a diagnose nutricional do eucalipto pelo CND (SILVA et al., 2004; 2005; MORAIS et al., 2019; ROCHA, 2020; PAULA et al., 2020). Além disso, a maioria das diagnoses nutricionais obtidas na literatura, independente da metodologia adotada, tem considerado apenas os macronutrientes como N, P, K, Ca, Mg e as

vezes o S em seus diagnósticos, sendo os micronutrientes como Cu, Fe, Zn, Mn e B, poucas vezes incluídos nessas análises.

Nos dias de hoje, devido ao sucesso nos programas de melhoramento florestal, materiais genéticos com altas taxas de crescimento têm sido preferencialmente utilizados nos plantios. Embora, sejam mais produtivos, estes possuem maior demanda nutricional e a inclusão não só dos macronutrientes, mas também dos micronutrientes, nos programas de fertilização florestal, ambos em maiores quantidades, tem sido observada (DUTRA, 2020). Altas doses dos nutrientes não significam necessariamente elevados ganhos em produtividade, uma vez que, como os nutrientes se interagem, processos conhecidos como sinergismo e antagonismo, o excesso de um nutriente pode influenciar na disponibilidade de outro nutriente, ocasionando em um desequilíbrio nutricional e conseqüentemente prejudicando a produtividade da cultura. Diante do exposto, estudos que utilizam de metodologias, como o CND, que podem diagnosticar o grau de equilíbrio dos plantios de eucalipto no Brasil, considerando além de macro os micronutrientes podem contribuir para a melhoria do manejo nutricional da cultura no país.

Assim como em outros métodos de interpretação de análise foliar, o CND também gera normas a partir de uma população de referência, priorizando aquela de alta produtividade. Esta, por sua vez, é obtida de forma arbitrária, ou seja, não há um critério de seleção. Alguns estudos tem selecionado a população de alta produtividade considerando o conhecimento prático da região de estudo, onde define-se um ponto de corte a partir do julgamento sobre o que deve ser um bom rendimento (PARENT e NATALE, 2008). Outros, têm selecionado com base no critério de ser aquela população que se encontra acima da média ou acima da média mais uma fração do desvio padrão (CAMACHO et al., 2012; DEZORDI et al., 2016; MORAIS, et al., 2019; BAHIA, 2021). Por outro lado, a fim de estabelecer uma metodologia para selecionar a população de referência utilizando o CND, Khiari et al. (2001a) utilizaram de uma função de variância cumulativa e a função de distribuição qui-quadrado para separar a população em alta e baixa produtividade. A população de alta produtividade para estabelecer a população de referência, ou seja, a população geradora das normas nos principais métodos de diagnose foliar, tem sido a mais recomendada. Pois, parte do pressuposto que nestas populações a nutrição e outros fatores de produção encontram-se em níveis ótimos, os teores dos nutrientes estão mais próximos dos ótimos fisiológicos e há menor variabilidade entre os teores e as interações nutricionais (WADT, 1996, NEVES et al., 2008).

Uma das metodologias utilizadas recentemente para definir a população de alta produtividade, para a diagnose nutricional de plantios de eucalipto, foi a abordagem da linha de fronteira (GALDINO, 2015). Nesta, o relacionamento entre variáveis dependentes e

independentes é plotado por meio de gráficos de dispersão, onde é permitido visualizar, na nuvem de pontos, uma linha que descreve o maior relacionamento ao longo dos intervalos considerados, a qual é denominada de linha de fronteira ou região de fronteira superior. Esta linha descreve a resposta das variações nos parâmetros testados, considerando que todos os outros fatores que podem influenciar na resposta estejam em condições ótimas. Por outro lado, dados que se encontram abaixo desta linha de relacionamento são influenciados por outros fatores não controlados (SCHNUG et al., 1996).

Na maioria dos trabalhos que utilizaram o CND como método de diagnose nutricional de povoamentos de eucalipto (SILVA et al., 2004; 2005; MORAIS et al., 2019; PAULA et al., 2020, ROCHA, 2020), estabeleceram a população de referência seguindo o critério arbitrário, ou seja, considerando a média mais uma fração de desvio padrão ou utilizando a metodologia proposta por Khiari et al. (2001a). Assim, estudos utilizando o CND na diagnose nutricional em povoamentos de eucalipto estabelecendo a população de referência pelo método da linha de fronteira são inexistentes.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do método CND na diagnose nutricional de plantios clonais de eucalipto, tendo como objetivos específicos a) gerar normas CND para plantios clonais de eucalipto a partir da população de alta produtividade estabelecida pela linha de fronteira; b) Identificar os nutrientes limitantes por falta ou por excesso; c) obter curvas de resposta potencial nutrientes específicas por dois métodos; d) obter as faixas de suficiência para avaliação do estado nutricional quanto ao grau de equilíbrio desses plantios; e) avaliar o status nutricional dos plantios de eucalipto pelas faixas de suficiência.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Origem e Conceito do CND**

A diagnose da composição nutricional (*Compositional Nutrient Diagnosis* – CND) foi desenvolvido no Canadá por Parent e Dafir (1992), sendo uma modificação/evolução do DRIS. Baseado na Análise de Dados Composicionais de Aitchison (1982), o CND é uma expansão multivariada dos métodos de diagnose foliar convencionais, como o nível crítico (univariado) e o DRIS (bivariado).

A teoria da análise de dados composicionais de Aitchison (1982) defende que uma estrutura de dependência se forma quando qualquer variação em qualquer parte do todo pode afetar os

valores relativos das outras partes do todo. Esse problema de fecho (curvatura) é conhecido como “bounded sum constraint” ou “restrição da soma limitada” e causa uma curvatura quando modelos lineares são utilizados. Para contornar esse problema, atenção deve ser dada ao somatório dos valores relativos de todos os componentes da estrutura, o qual, deve ser igual a 1,0 ou 100%.

Baseado nessa teoria, o CND reconhece que há uma estrutura de dependência entre os nutrientes das plantas, em que a ocorrência de uma mudança em certas proporções de nutrientes no tecido, provoca alterações em suas outras proporções, uma vez que a composição da planta é restrita a 100% do teor da matéria seca (PARENT et al., 1993). Assim, o CND é capaz de remover esse problema de curvatura que ocorre ao se utilizar os métodos de diagnose nutricional univariados, quando os nutrientes são tratados isoladamente e, bivariados, quando os nutrientes são analisados tomados dois a dois (PARENT e DAFIR, 1992).

Mesmo o CND sendo uma modificação do DRIS, seu conceito difere deste último em dois aspectos: o primeiro é que o CND fornece um fator de correção, denominado média geométrica da composição nutricional ( $G(x)$ ), para qualquer nutriente, dados todos os nutrientes em análise, isto é, uma razão multinutrientes; já o DRIS fornece um único fator de correção para qualquer nutriente, dando informações sobre outro nutriente, ou seja, uma razão dupla. O segundo aspecto é que o CND gera novas variáveis, denominadas  $V_i$  ou variáveis multinutrientes, as quais, são passíveis de análise multivariada de dados de composição tecidual (PARENT e DAFIR, 1992).

Esta razão multinutrientes do CND dá uma ideia da interação entre os nutrientes e todos os outros componentes de um conjunto de dados composicional ao corrigir qualquer nutriente  $X_i$  para a média geométrica  $G(x)$ . Essa correção é denominada de “transformação logarítmica centrada”, do inglês, 'centered log-ratio' – clr e considera que a soma de todos os componentes da amostra se restringe a 100%, incluindo o valor de complemento (R). Este valor R é a diferença entre 100% e o somatório de todos os nutrientes envolvidos na análise, obtendo-se a nova variável  $V_i$ . Assim, esta função logarítmica lineariza as frações de nutrientes e possibilita o uso do CND em diagnósticos multivariados, além de evidenciar a sua total compatibilidade em análises de componentes principais (ACP) (AITCHISON, 1982; PARENT e DAFIR, 1992; PARENT et al., 1993).

Vale ressaltar, que a ACP só é possível de ser realizada após a linearização, por meio de transformações logarítmicas, das funções que envolvem as variáveis originais, como é feito para os cálculos dos índices CND. O objetivo dessa linearização é melhorar a compreensão da composição do tecido em comparação com qualquer outro método de diagnose nutricional, seja

univariado (NC) ou bivariado (DRIS). Além disso, à medida que aumenta o número de nutrientes que são analisados simultaneamente, a consistência do diagnóstico aumenta até que o método de interpretação envolva todos os nutrientes (HOLLAND, 1966). Assim, o CND fundamenta-se em aprimorar os métodos já existentes e, com isso, obter diagnósticos nutricionais mais consistentes. Isso porque, a razão entre todos os nutrientes em análise, considerando a influência de outros componentes que influenciam na estrutura dos tecidos vegetais, tende a representar melhor a indicação do estado nutricional das culturas, quando comparada aos diagnósticos que avaliam as concentrações dos nutrientes de forma isolada ou por meio de relações duais.

## **2.2. Aplicações do CND**

Inicialmente o sistema CND foi aplicado na avaliação nutricional da cultura do tomate com o objetivo de determinar a relação entre o DRIS e o CND e, avaliar a aplicabilidade do CND para um diagnóstico multivariado utilizando a ACP (PARENT et al., 1993). Neste estudo, os autores verificaram que os índices DRIS e CND foram altamente correlacionados (0,964 a 0,987,  $p < 0,01$ ) para N, P, K, Ca e Mg, evidenciando que esta estreita correlação entre os índices de ambos os métodos permite que a análise bivariada do DRIS possa ser expandida para uma abordagem multivariada utilizando o CND. Os autores também verificaram que o uso do CND possibilita a correção de algumas distorções na modelagem linear inerente à abordagem DRIS. Além disso, perceberam que ao utilizar o CND conjuntamente com a ACP, são descartadas informações aleatórias, obtendo-se apenas fatores significativos que contém informações interpretáveis sobre interações de nutrientes, como diluição ou concentração.

Nesse mesmo sentido outros estudos também foram realizados com o objetivo de correlacionar os índices DRIS com CND para culturas como batata (PARENT et al., 1994a) e cenoura (PARENT et al., 1994b), obtendo-se resultados semelhantes ao trabalho anterior em que os índices DRIS e CND foram altamente correlacionados. A abordagem do CND também foi comparada com a abordagem do NC para diagnosticar o status do N em culturas como cebola, batata e coníferas (PARENT et al., 1995). Neste caso, o método CND mostrou-se menos distorcido quando comparado ao NC para o diagnóstico do status do N para as três culturas, permitindo assim uma análise mais consistente referente à deficiência, à faixa de suficiência e ao excesso de nutrientes ao utilizar a metodologia do CND.

Ao longo dos anos vários trabalhos foram surgindo objetivando comparar a abordagem do CND com outros métodos de diagnose foliar como NC, DRIS, M-DRIS, Chance Matemática e KW (PARENT et al., 1994b; SCHALER et al., 1995; KHIARI et al., 2001b; KHIARI et al., 2001c; KURIHARA, SILVA et al., 2004; SERRA et al., 2010ab; CAMACHO et al., 2012; PARTELLI et al., 2014; MATOS et al., 2016; CALHEIROS et al., 2018; ROCHA, 2020; BAHIA, 2021). Para a maioria desses trabalhos a diagnose realizada por métodos univariados tem baixa ou nenhuma correlação ou concordância com a diagnose realizada pelo CND. Por outro lado, a comparação deste método com métodos que levam em consideração a relação dual entre os nutrientes (DRIS) apresenta alta correlação e maior frequência de concordância na diagnose nutricional. Entretanto, em algumas situações a diagnose realizada pelo CND se mostrou superior, quando comparada com a diagnose realizada pelo DRIS.

Como dito anteriormente, o CND também pode ser aplicado conjuntamente com análises multivariadas. Holland (1966), ao estudar a composição vegetal comparou várias abordagens e recomendou que a ACP poderia melhorar o diagnóstico nutricional após a transformação apropriada dos dados brutos dos nutrientes. Com a transformação logarítmica centrada, que é realizada no cálculo do CND para obter as variáveis multinutrientes, este método torna-se totalmente compatível com a ACP, e vários estudos foram realizados ao longo dos anos para demonstrar a aplicação conjunta desses métodos (TREMBLAY et al., 1993; PARENT et al. 1994ab; ABBES et al., 1995; DOUCET, 1997; BHARGAVA e RAGHUPATHI, 1999; RAGHUPATHI et al., 2002; ANJANEYULU et al., 2008; EL KADRI, JESUS, 2017; GARBA et al., 2018; GEIKLOOI et al., 2021). Em grande parte desses trabalhos, foi demonstrando que o uso da ACP nas variáveis multinutrientes é uma importante ferramenta de interpretação da interação que ocorre entre os nutrientes e, até, entre o valor de complemento R. Assim, a aplicação conjunta do CND com ACP permite obter informações adicionais ao equilíbrio nutricional da cultura sob diagnose, resultando em informações no que diz respeito às relações entre os nutrientes como sinergismo, antagonismo, diluição, concentração e consumo de luxo.

Como os primeiros trabalhos que aplicaram o CND na diagnose nutricional apresentaram resultados satisfatórios, nos quais o método demonstrou ser mais sensível e consistente para a diagnose foliar, muitos pesquisadores vêm utilizando-o na avaliação nutricional de várias culturas. Isto porquê, além de avaliar o grau de equilíbrio, o CND também avalia o grau de balanço nutricional das lavouras, de acordo com os valores de  $G(x)$  (SILVA, 2001). Ademais, a aplicação deste método permite gerar normas universais e específicas para a cultura avaliada (SILVA et al., 2004), ordenar a limitação dos nutrientes na planta, seja por deficiência ou toxicidade (SERRA et al., 2010a; PARTELLI et al., 2014; MATOS et al., 2016; SILVA e

CHIAIA, 2021), incorporar o conceito de potencial de resposta à adubação, semelhante ao que é feito no DRIS (SILVA et al., 2004; URANO et al., 2006), obter curvas de respostas potenciais à nutrientes específicos (SERRA et al., 2010b; BAHIA, 2021) e obter, também, faixas de suficiência de nutrientes (SERRA et al., 2010b; MATOS et al., 2016; ROZANE et al., 2020).

A diagnose da composição nutricional já foi aplicado na avaliação nutricional de culturas hortaliças como tomate (PARENT et al., 1993; NOWAKI et al., 2017), batata (PARENT et al., 1994a; PARENT et al., 1995; KHIARI et al., 2001c; GANESHAMURTHY et al., 2019), cenoura (PARENT et al., 1994b; DEZORDI et al., 2016; SILVA et al., 2017), cebola (ABBES et al., 1995; PARENT et al., 1995; PARENT e KHIARI, 2003; YOUSUF et al., 2013), em culturas agrícolas como soja (KURIHARA, 2004; URANO et al., 2006, 2007; CAIRES et al., 2020), milho (KHIARI et al., 2001ab; MAGALLANES-QUINTANAR et al., 2006; PARENT et al., 2009; GOTT et al., 2017; GARBA et al., 2018), cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2013; CALHEIROS et al., 2018; SILVA et al., 2020, 2021; SILVA e CHIAIA, 2021), feijão (GARCÍA-HERNÁNDEZ et al., 2005; PARTELLI et al., 2014), algodoeiro (SERRA et al., 2010ab; TRASPADINI, 2019), em culturas perenes como cafeeiro (WADT e DIAS, 2012; SCHMIDT, 2015), oliveiras (GIMENEZ et al., 2021), videiras (SCHALER et al., 1995; BHARGAVA e RAGHUPATHI, 1999; SCHALER et al., 2002; KUMAR et al., 2003; MOSTASHARI et al., 2018; ROZANE et al., 2020; BRUNETTO et al., 2020) e em frutíferas como a cultura da laranja (CAMACHO et al., 2012; DIAS et al., 2013, 2017), da manga (ROZANE et al., 2013; POLITI et al., 2013; ALI, 2018), da goiaba (ANJANEYULU et al., 2008), da banana (GUIMARÃES e DEUS, 2021) e das amendoeiras (FERRÁNDEZ-CÁMARA et al., 2021).

No Brasil, os primeiros estudos a aplicar o método CND foram para a cultura da soja (KURIHARA, 2004; URANO et al., 2006, 2007) e do eucalipto (SILVA et al., 2004, 2005). Nestes, os autores obtiveram normas gerais e específicas para as culturas avaliadas, ordenaram os nutrientes que poderiam estar limitando o crescimento da cultura, incorporaram o conceito do potencial de resposta à adubação e compararam a diagnose foliar obtida pelo CND com outros métodos de avaliação nutricional.

Na área florestal o CND foi inicialmente aplicado para a avaliação nutricional de mudas de coníferas (PARENT et al., 1995), de árvores dos gêneros *Betula*, *Populus*, *Picea* e *Abies*, dominantes na Floresta Boreal Sul no Canadá (DOUCET, 1997), de árvores de abeto da Noruega (*Picea abies*) (SCHLEPPI et al., 2000) e na cultura do eucalipto (SILVA et al., 2004, 2005). Diante dos resultados obtidos nesses primeiros estudos, pesquisas baseadas na metodologia CND vem evoluindo significativamente, possibilitando adotar práticas de

monitoramento e manejo nutricional mais consistentes e precisas. Isso leva à uma melhor compreensão dos aspectos nutricionais, resultando em um melhor gerenciamento florestal e, conseqüentemente, ao alcance de elevados índices de produtividade, uma vez que os programas de adubação tornam-se mais eficientes.

Diante do exposto, verifica-se que há uma diversidade de trabalhos que compreendem uma gama de culturas em que o CND foi empregado. Com isso, essa metodologia pode ser considerada promissora para a avaliação nutricional, a partir da qual pode-se gerar normas CND de referência para diversas culturas, avaliar o balanço e o equilíbrio nutricional, classificar os nutrientes em ordem de limitação, seja por deficiência ou excesso, obter teores ótimos e faixas de suficiência para macro e micronutrientes, avaliar a interação entre os nutrientes, como sinergismo e antagonismo, e, por fim, gerar curvas de resposta nutrientes específicas para cada nutriente analisado.

### **2.3. População de referência**

Um dos primeiros passos ao se utilizar métodos de diagnose foliar é determinar uma população de referência. Esta, será utilizada para gerar normas nutricionais, as quais servirão de parâmetros de comparação para avaliar se uma determinada lavoura encontra-se em balanço e, ou equilíbrio nutricional. Dos inúmeros trabalhos que utilizaram métodos de diagnose foliar como KW, DRIS e até mesmo o CND, as populações de referência foram obtidas considerando-se as produtividades das lavouras (ABBES et al., 1995; SILVA et al., 2004; CAMACHO et al., 2012; MATOS et al., 2016; CALHEIROS et al., 2018; PAULA et al., 2020; BAHIA, 2021). Diante disso, alguns pesquisadores defendem que a melhor população geradora das normas é aquela de média produtividade, pois essas refletem a variabilidade dos teores dos nutrientes (BEAUFILS, 1973). Outros, já recomendam a utilização de toda a população, visto que se terá a melhor representação das condições reais da cultura (BEVERLY, 1987). Para a maioria dos estudos, a recomendação é o uso da população de alta produtividade (WADT, 1996; SILVA et al., 2004; 2005; ROCHA, 2008, DIAS et al., 2013; 2017; GEIKLOOI et al., 2021), partindo do pressuposto de que essas populações possuem a nutrição e os outros fatores de produção em condições ótimas (NEVES et al., 2008). Além disso, na população de alta produtividade os teores dos nutrientes estão mais próximos dos ótimos fisiológicos (WADT, 1996), há menor variabilidade entre os teores e as interações nutricionais, obtendo-se maior grau de precisão e,

por fim, à medida que a produtividade é maior a distribuição da frequência dos teores e de suas interações se ajustam mais a normalidade (GALDINO, 2015).

A determinação da população de referência, como sendo a de alta produtividade, tem sido realizada em grande parte dos estudos de avaliação nutricional (KURIHARA, 2004; SILVA et al., 2004; URANO et al., 2006; GALDINO, 2015; DEZORDI et al., 2016; GOTT et al., 2017; ALI, 2018). Entretanto, a maioria deles não apresenta um critério padrão de seleção. Para o CND, a obtenção da população de referência tem sido feita de maneira arbitrária, a partir do julgamento sobre o que deve ser um bom rendimento (PARENT e NATALE., 2008). Assim, alguns estudos têm selecionado a população de referência como sendo aquela com produtividade igual ou maior a um ponto de corte, avaliado empiricamente (ABBES et al., 1995; DIAS et al., 2013; CALHEIROS et al., 2018; CAIRES et al., 2020); outros têm selecionado com base no critério de ser aquela população que se encontra acima da média ou acima da média mais uma fração do desvio padrão (CAMACHO et al., 2012; DEZORDI et al., 2016; MORAIS, et al., 2019; BAHIA, 2021). Caires et al. (2020), utilizando o CND para a avaliação nutricional da cultura da soja determinaram a população de referência como aquela que apresentasse produtividade superior a  $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  de grãos, sendo esse o valor correspondente à 120% da média da produtividade de grãos obtida no estado do Paraná no ano de 2014. Bahia (2021), estudando o status nutricional do cacauzeiro, estipulou como população de referência aquela com produtividade relativa dos frutos acima da média mais meio desvio-padrão.

Na cultura do eucalipto, Silva et al. (2004) estabeleceram a população de referência como aquela em que o incremento médio anual (IMA) fosse superior à média mais 0,5 desvio-padrão. Moraes et al. (2019), avaliando o status nutricional de mudas de eucalipto determinaram a população de referência de acordo com o valor de massa seca (MS) ou do Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Populações com esses valores superiores à média compreendiam a população de referência. Paula et al. (2020), diagnosticaram o estado nutricional de povoamentos jovens (0,9 a 1,1 anos) de eucalipto, dividindo a população em subpopulações de baixa e alta produtividade com base no diâmetro a 1,30 m do solo (*dap*) crítico, em que a população de alta produtividade fosse aquela que apresentasse *dap* acima de 4,3 cm, sendo este valor considerado economicamente viável e como sendo o ponto de corte para a população de referência.

Diante da ausência da definição de uma metodologia única e padronizada para a seleção da população de referência, vários estudos vêm sendo realizados ao longo dos anos a fim de preencher essa lacuna. A primeira proposta de metodologia foi feita por Walworth e Sumner

(1987) indicando que se deveria considerar as relações de variância de expressões de nutrientes. Já Parent e Dafir (1992), ao desenvolverem o método CND, esperavam que os próprios cálculos aplicados à análise multivariada fossem capazes de determinar uma maneira de se obter a subpopulação de alta produtividade. Nesse mesmo sentido, Parent et al. (1994a) propuseram a função de distribuição qui-quadrado para definir o valor limite de CND para o equilíbrio de nutrientes e, a partir deste, determinar a subpopulação de alta produtividade. De modo mais objetivo, Khiari et al. (2001a) propuseram uma metodologia para estipular a subpopulação de alta produtividade utilizando a função de variância cumulativa e a função de distribuição qui-quadrado. Neste estudo, os autores concluíram que a população pode ser dividida em subpopulações de alta e baixa produtividade através do ponto de inflexão dado pela equação da segunda derivada de uma função cúbica ( $y = -b/3a$ ); além disso, essa metodologia pode ser associada à função qui-quadrado para fornecer o índice CND limite de desequilíbrio de nutrientes. A divisão da população em subpopulações de baixa e alta produtividade utilizando a função de variância cumulativa para obter a população de referência foi empregada em vários estudos (KHIARI et al. 2001b; BLANCO-MACIAS et al., 2006; ROZANE et al., 2013; EL KADRI, JESUS, 2017; ALI, 2018; GEIKLOOI et al 2021). No entanto, mesmo com o potencial uso dessa metodologia alguns pesquisadores ainda sugerem que outras funções ou conceitos sejam desenvolvidos (PARENT e NATALE, 2008).

Metodologia desenvolvida mais recentemente por Galdino (2015) foi com base em determinar a população de alta produtividade utilizando-se do conceito de linha de fronteira. De acordo com esse autor, o uso de métodos mais convencionais, como estabelecer a população de alta produtividade utilizando-se da média e do desvio-padrão pode gerar resultados inconsistentes, uma vez que as normas nutricionais geradas por essa população não refletem a condição nutricional das lavouras ótimas quanto à produtividade, mas sim, de uma população de boas lavouras quanto a produtividade.

A abordagem da linha de fronteira foi descrita por Webb (1972), na qual o relacionamento entre variáveis dependentes e independentes é visualizado por meio de gráficos de dispersão. Nesse contexto, a linha que descreve o maior relacionamento ao longo de intervalos de valores definidos é conhecida como linha limite, uma vez que, representa a região superior do banco de dados. Esta linha descreve a resposta das variações nos parâmetros testados, considerando que todos os outros fatores que podem influenciar na resposta estejam em condições ótimas. Por outro lado, dados que se encontram abaixo desta linha de relacionamento têm sua resposta influenciada por outros fatores não testados (SCHNUG et al., 1996). Assim, a aplicação do conceito da linha de fronteira em uma ampla base de dados de lavouras comerciais permite que

se obtenha a população de alta produtividade, isolando o efeito de determinado fator de produção (MEDIIVILLA e ESCUDERO, 2003).

Diante disso, ao relacionar num gráfico a produtividade em função de fatores como idade, teor do nutriente ou de relações entre os nutrientes (índices DRIS ou índices CND), verifica-se uma região de pico de produtividade que corresponde à uma determinada idade, teor do nutriente ou de relações duais ou multinutrientes que pode ser entendido como o valor ótimo (GALDINO, 2015). Este mesmo autor, realizou a avaliação nutricional de povoamentos de eucaliptos utilizando métodos de diagnose foliar como o KW e o DRIS. O banco de dados continha 9.608 registros e a população de referência foi estabelecida utilizando o conceito de linha de fronteira. No relacionamento gráfico, a altura foi considerada a variável de produtividade (dependente) e a idade a variável independente. Após a plotagem dos 9.608 registros no gráfico de dispersão, 78 deles compreendiam a região de fronteira do relacionamento, os quais, foram considerados a população de alta produtividade e conseqüentemente a população de referência.

O conceito de linha de fronteira vem sendo aplicado na área de diagnose nutricional com base em análise foliar (FERNANDES, BLANCO-MACIAS et al., 2010; BORGES, 2012, ALI, 2018), na área da fertilidade e física do solo (EVANYLO & SUMNER, 1987; OLIVEIRA, 2010), na determinação da população de referência para métodos de diagnose foliar como DRIS e KW (GALDINO, 2015) e, também, na geração de curvas de resposta nutrientes específicas (BAHIA, 2021).

A escolha adequada da população de referência para o uso do CND é primordial para a obtenção de um diagnóstico nutricional mais preciso e consistente, isto porque essa escolha irá influenciar diretamente na relação entre os índices CND e a produtividade.

#### **2.4. Formação do banco de dados**

O banco de dados nada mais é que o conjunto de informações necessárias para a avaliação nutricional das culturas. Este, deve disponibilizar, principalmente, informações referentes aos teores nutricionais e à produtividade das mesmas. Os teores dos nutrientes são geralmente obtidos pela análise foliar (JESUS, 2017; SILVA et al., 2017; CALHEIROS et al., 2018; PAULA et al., 2020; BAHIA, 2021; GIMENEZ et al., 2021). Entretanto, alguns trabalhos também têm utilizado concentrações nutricionais de outras partes das plantas como a flor (OLIVEIRA et al., 2020), raiz (EL KADRI, 2017), sementes (CAIRES et al., 2020), galhos,

casca e lenho (SILVA et al., 2004; 2005). Mesmo diante de resultados satisfatórios ao utilizar essas outras partes da planta, a análise foliar ainda é predominante na maioria dos estudos, uma vez que a folha é o órgão fisiologicamente mais ativo, responsável pela produção de assimilados e, também, por apresentar maior correlação entre os teores dos nutrientes e a produtividade das culturas (SILVA, 2001; CANTARUTTI et al., 2007). Por outro lado, informações sobre produtividade são dependentes da cultura avaliada, podendo-se obter a mesma em  $\text{kg ha}^{-1}$  ou  $\text{Mg ha}^{-1}$  para a produção de frutos, grãos e biomassa (MORAIS et al., 2019; CAIRES et al., 2020; GEIKLOOI et al., 2021),  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  para a produção de volume de madeira (SILVA et al., 2004) e, até mesmo, em centímetros (cm) ou metros (m) para as variáveis de produção como altura e diâmetro da planta (PAULA et al., 2020).

Outras informações também podem estar disponíveis na base de dados. Essas, podem ser consideradas complementares e até essenciais para a diagnose nutricional como genótipo utilizado, características de solo (classificação, física e química do solo), características do clima (precipitação, temperatura, luminosidade), idade da planta, região de plantio, entre outras. Quanto maior o número de informações maior a probabilidade de se obter resultados mais precisos e interpretações mais coerentes. Além disso, essas outras variáveis permitem a geração tanto de normas universais, quando utilizado todo o conjunto de dados, quanto a geração de normas específicas, quando os dados são avaliados de forma estratificada. Podem, ainda, ser comparadas e avaliadas quanto a precisão dos seus diagnósticos, possibilitando a recomendação do uso de normas universais e, ou específicas de acordo com a cultura avaliada (SILVA et al., 2005).

Esse conjunto de informações que é compreendido pelo banco de dados pode ser obtido em condições de campo, bem como em condições experimentais. Para obter os valores dos teores nutricionais, amostras dos tecidos a serem analisados, geralmente a folha, são coletadas, preparadas e enviadas para o laboratório para que as análises químicas do tecido sejam realizadas. De posse desses valores, juntamente com a variável de produtividade os cálculos são realizados e as normas CND obtidas para a cultura alvo. Nesse contexto, para maior representatividade das normas, é necessário que o banco de dados apresente informações compreendendo toda a variabilidade da população (WALWORTH e SUMNER, 1987; HALLMARK et al., 1990).

Outro ponto importante na preparação do banco de dados é sua correta estruturação. Quando se obtém informações que são capazes de expressar as principais características da população avaliada há maior probabilidade de se realizar uma análise mais precisa e um diagnóstico nutricional ajustado à essa população. Ademais, a análise de dados será feita adequadamente se

não houver correlação entre as observações, isto é, para a correta análise dos dados os erros associados às variáveis avaliadas devem ser independentes, pois, falta de independência pode ser um grave problema e comprometer as inferências sobre as médias geradas (VIEIRA, 2006). Vale destacar, também, que para uma correta avaliação nutricional todos os dados de campo e, ou experimentais devem estar incluídos na base de dados, como tratos culturais, manejo do solo e da fertilização (NASCIMENTO, 2014), controle de pragas, doenças e plantas daninhas. Com todas essas informações reunidas é possível ter como resultado um diagnóstico mais completo e pertinente da cultura em estudo, identificando com maior clareza os fatores limitantes à produtividade (CRESTE, 2008).

O tamanho da amostra também é relevante quando o assunto é avaliação nutricional. A amostragem está entre as etapas da avaliação nutricional mais sujeita a erros, sendo considerada a mais adequada, aquela em que se consegue representar a área o melhor possível, com o menor número de plantas ou unidades amostrais que atendam a um erro amostral pré-estabelecido (ROZANE et al., 2007, 2009). Nas pesquisas desenvolvidas com o CND não existe um padrão referente ao tamanho amostral da população base (Tabela 1). Entretanto, na maioria dos trabalhos que envolvem amostragem, recomenda-se que quanto maior o tamanho da amostra menor é o erro amostral obtido (ROZANE et al., 2009; HERNANDES et al., 2011), resultando assim em análises mais consistentes.

Tabela 1: Quantidade de unidade de amostra para a obtenção das normas CND

| Autor                        | Cultura        | Tamanho da Amostra |
|------------------------------|----------------|--------------------|
| Parente et al. (1993)        | Tomate         | 20                 |
| Camacho et al. (2012)        | Laranja        | 50                 |
| Partelli et al. (2014)       | Feijão         | 55                 |
| Serra et al. (2010)          | Algodão        | 65                 |
| Kurihara (2004)              | Soja           | 173                |
| Silva et al. (2021)          | Cana de açúcar | 183                |
| Bhargava e Raghupathi (1999) | Uva            | 220                |
| Morais et al. (2019)         | Eucalipto      | 222                |
| Parente e Khiari (2003)      | Cebola         | 229                |
| Khiari et al. (2001b)        | Milho          | 240                |
| Dias et al. (2017)           | Laranja        | 243                |
| Bahia (2021)                 | Cacau          | 309                |
| Silva et al. (2004)          | Eucalipto      | 993                |
| Paula et al. (2020)          | Eucalipto      | 1861               |

Dentre as dificuldades de se elevar o tamanho amostral da base de dados pode-se destacar o custo e a necessidade de mão-de-obra e treinamento de equipe de campo para a padronização das amostras de tecidos que serão coletadas. Segundo Khiari et al. (2001a), a aquisição de dados é cara e, conseqüentemente, os bancos de dados possuem tamanho limitado. Por outro lado,

quanto maior o número de unidades amostrais avaliadas maior a probabilidade de dispor de informações que representem toda a variabilidade da população-alvo. Estudos sobre amostragem geralmente estão condicionados a atender um nível de precisão desejado, geralmente um erro amostral em torno de 10% (ROZANE et al., 2007; HERNANDES et al., 2011). Nestes trabalhos, verifica-se que à medida que se aumenta o número de unidades de amostras o erro amostral é reduzido. Alguns estudos têm sido realizados para identificar o número mínimo de folhas e, ou plantas que seja suficiente para reduzir a variação dos resultados a um nível de erro amostral aceitável (ROZANE et al., 2007; 2009). No entanto, estudos que avaliam o tamanho amostral para a quantidade de lavouras a serem avaliadas para a população base ainda são escassos.

Para o CND, tanto os trabalhos desenvolvidos com um elevado número de unidades de amostras quanto aqueles com pequenos números de observações apresentaram resultados satisfatórios (PARENT e KHIARI, 2003; SERRA et al., 2010ab; DIAS et al., 2017; PAULA et al., 2020; SILVA et al., 2021). A metodologia desenvolvida por Khiari et al (2001a) para gerar normas CND de nutrientes foliares é um procedimento simples e que pode ser aplicado adequadamente para a diagnose nutricional utilizando base de dados de pequeno porte, principalmente, se o objetivo é realizar o levantamento de um grande número de culturas a baixo custo. Pode-se destacar que essa metodologia, associada à função qui-quadrado para normas CND, é um modelo suporte que auxilia na avaliação nutricional de culturas com pequenos bancos de dados (KHIARI et al., 2001b).

Mesmo diante dessa vantagem apresentada para o CND, Nascimento (2014) enumera alguns aspectos que devem ser considerados ao utilizar uma pequena base de dados para a avaliação nutricional das culturas: a) um pequeno número de unidades de amostras representativa de uma população pode aumentar o erro agregado à estimativa do valor ótimo para uma determinada relação nutricional; b) um pequeno número de unidades de amostras pode reduzir a confiabilidade de que a mesma represente a população da qual foi extraída e, por fim, c) as estimativas das normas geradas podem originar índices não condizentes com o real cenário, resultando em interpretações inconsistentes.

Diante disso, o tamanho da base de dados, ou seja, o número de parcelas, lavouras ou talhões a serem diagnosticados pode variar de acordo com o nível de precisão requerido, principalmente se o objetivo é gerar normas universais ou específicas, além da mão-de-obra e dos recursos financeiros disponíveis. Vale destacar que, além do tamanho da amostra, a qualidade dos dados também é primordial para a obtenção de diagnósticos nutricionais mais precisos e consistentes.

## 2.5. Estabelecimento das normas CND

As normas CND são estabelecidas através de uma população de referência, sendo uma das primeiras etapas da avaliação nutricional. A população de referência é dada pelo subconjunto de dados que compreende a população de alta produtividade. Esta, por sua vez, é selecionada, pois considera-se que lavouras com produtividades elevadas possuem todos os fatores de crescimento em níveis ótimos ou próximos do ótimo. Diante disso, as normas geradas por esse subconjunto de dados são consideradas balanceadas e equilibradas nutricionalmente e são utilizadas como referência para a diagnose nutricional do restante da população, ou seja, do subconjunto de dados de baixa produtividade.

As normas CND correspondem às médias e aos desvios-padrão das variáveis multinutrientes da população de alta produtividade (PARENT e DAFIR, 1992). Essas variáveis são resultado de uma transformação logarítmica centrada (*centred log ratio – clr*) proposta por Aitchison (1986) e por isso são também denominadas de razão logarítmica centrada (*clr*) ou CND-*clr* (PARENT e DAFIR, 1992; KHIARI et al., 2001a; EL KADRI, 2017, MENESES, 2017; ALI, 2018; GEIKLOOI et al., 2021). Esta transformação é realizada, pois o CND foi desenvolvido baseado na teoria da análise composicional. De acordo com essa teoria, os dados em análise fazem parte de um *simplex* ( $S^d$ ), em que a soma entre eles será igual a 1,0 (um) para frações, 100% para dados em porcentagem, ou dependendo da unidade de medida, a soma será igual  $10^3 \text{ g kg}^{-1}$  ou  $10^6 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esta restrição imposta no somatório entre os dados composicionais gera uma perturbação no *simplex*, em que, toda modificação em um componente deve afetar um ou vários outros componentes do sistema, a fim de manter a soma na unidade de medida. Assim, a transformação logarítmica dos dados é utilizada para controlar esta perturbação no *simplex* (PARENT e NATALE, 2008).

Outro aspecto importante ao utilizar a transformação logarítmica é que as concentrações dos nutrientes no tecido vegetal encontram-se de maneiras variadas, podendo haver discrepância entre eles, caso sejam utilizados na sua forma bruta. Sendo assim, essa transformação dos dados evita que ocorra tal discrepância e, ainda, lineariza as concentrações nutricionais, ou seja, os dados não transformados pertencem a um sistema fechado que varia de 0 a 100% e, com a transformação logarítmica, os dados passam a pertencer a um sistema aberto, que varia do negativo ao positivo, tendendo ao infinito. Além disso, os dados não transformados possuem distribuição assimétrica, enfatizando que sua transformação é essencial para que a distribuição normal seja mantida (EL KADRI, 2017).

A restrição da soma limitada também é removida utilizando um fator de correção denominado média geométrica da composição nutricional  $G(x)$ . Esta, considera a interação entre todos os nutrientes em análise mais o valor de complemento R. Esse valor de complemento é composto de componentes indeterminados, além de erros experimentais, ou seja, trata dos outros componentes do tecido não avaliados como C, H, O, metais, entre outros. Considerando que uma proporção multinutriente é uma expressão para cada componente da planta em relação a todos os outros componentes (PARENT et al. 1995), ao corrigir qualquer nutriente  $X_i$  para a média geométrica  $G(x)$  de todos os nutrientes, o efeito de todos os nutrientes é considerado e não apenas o efeito de um ou dois nutrientes. Diante disso, o uso do fator de correção  $G(x)$  conjuntamente com a transformação logarítmica é a chamada transformação logarítmica centrada que resulta nas variáveis multinutrientes  $V_i$  que serão utilizadas como as normas.

A seleção das normas CND será realizada de acordo com o método utilizado para a determinação da população de referência. Como dito anteriormente, a população de referência é aquela de alta produtividade podendo ser obtida de forma empírica (DIAS et al., 2013; CALHEIROS et al., 2018; CAIRES et al., 2020) ou pela função de variância cumulativa e a função de distribuição qui-quadrado (KHIARI et al., 2001a). De posse dos valores de  $V_i$  da população de referência, as normas serão as médias aritméticas e o desvio-padrão de cada variável  $V_i$  para cada nutriente em análise. As normas também consistem na média e no desvio-padrão para a média geométrica da composição nutricional  $G(x)$  da população de referência.

Outro ponto que merece destaque quanto as normas CND é em relação a universalidade das mesmas. Para o DRIS, a universalidade das normas vem sendo discutida em vários trabalhos (KURIHARA, 2004; SILVA et al., 2005; FERNANDES, 2010; RODRIGUES FILHO et al., 2021), porém, para o CND, essa discussão ainda é incipiente (SILVA et al., 2005). O termo universalidade refere-se ao uso de normas gerais, ou seja, são aquelas normas geradas a partir de um banco de dados que compreende uma diversidade de genótipos, sistemas de manejo, condições climáticas, época de amostragem, condições edáficas, região de cultivo, idade, parte da planta, entre outros (SILVA et al., 2005; NASCIMENTO, 2014). Essa ideia de que as normas geradas pelo DRIS são universais, parte do pressuposto de que as relações duais entre os nutrientes obtidas pelo DRIS apresentam maior constância, quando comparadas com os seus teores individuais. Assim, há uma certa independência no uso do DRIS em relação aos fatores que influenciam nos teores de nutrientes (SILVA et al., 2005). Como o CND é uma expansão das interações duais, evoluindo para uma análise multivariada, na qual a relação entre todos os

nutrientes é avaliada e não somente a relação entre dois nutrientes, espera-se que as normas geradas pelo CND também possam ser aplicadas de forma universal.

Entretanto, o trabalho realizado por Silva et al. (2005) mostrou concepção contrária. Estes autores avaliaram a universalidade das normas CND em povoamentos de eucalipto abrangendo plantios em regiões do Centro-Leste de Minas Gerais. Foram geradas tanto normas universais, compreendendo toda a base de dados (conjunto das localidades), quanto normas específicas, geradas separadamente para cada localidade da região de estudo (Cocais, Piracicaba, Rio Doce, Sabinópolis, Santa Bárbara e Virginópolis). Com os resultados obtidos os autores verificaram que houve diferença ao comparar as normas CND gerais com as normas CND específicas. Diante disso, concluíram inexistência de universalidade das normas e recomendaram a utilização de normas específicas, em vez de normas gerais.

A universalidade das normas CND necessita ser mais explorada, visto que existem poucos estudos nessa área. Assim, mais trabalhos que comparem o uso de normas CND gerais com normas CND específicas devem ser realizados para que essa lacuna possa ser preenchida. O uso de normas universais pode ser vantajoso, pois há uma tendência em se obter resultados com melhor abordagem para a variabilidade entre todos os nutrientes avaliados e, também, pela possibilidade da multiplicação no uso das normas universais em diversas situações, sem qualquer perda da capacidade da avaliação nutricional.

## **2.6. Cálculos CND**

Os cálculos necessários para a diagnose nutricional realizada pelo CND consistem na obtenção das variáveis multinutrientes e, posteriormente, nos índices CND. As primeiras são obtidas modificando as concentrações nutricionais das amostras do tecido vegetal por transformações logarítmicas e corrigindo-as pela média geométrica da composição nutricional. Já os índices CND são obtidos pela distância padronizada entre a norma e a razão logarítmica centrada, correspondente à amostra independente (PARENT e DAFIR, 1992).

### **2.6.1. Variáveis multinutrientes**

Para o cálculo das variáveis multinutrientes, inicialmente três tipos de transformações logarítmicas foram propostos, como a transformação logarítmica aditiva (do inglês, 'additive log-ratio' - *alr*), a razão logarítmica centrada (do inglês, 'centered log-ratio' - *clr*) (AITCHISON,

1986) e a transformação logarítmica isométrica (do inglês, 'isometric log-ratio' - *ilr*) (EGOZCUE et al., 2003). Na *alr* a transformação logarítmica é dada pela fração de um valor de um componente no numerador pelo valor de um componente base no denominador, como por exemplo  $\log(N/R)$ , sendo N a concentração do nutriente e R o valor de complemento (PARENT e NATALE, 2008). Este tipo de transformação é apropriado para análises multivariadas, porém, não é muito utilizada nos cálculos das variáveis CND, pois, não são ortogonais entre si, obtendo-se distâncias oblíquas e tornando-as difíceis de interpretar (VAN DEN BOOGAART et al., 2013).

Em contrapartida, a transformação *clr* é dada pela relação logarítmica, considerando-se um componente base no numerador e a média de todos os componentes do sistema no denominador, isto é, a média geométrica da composição nutricional. Neste tipo de transformação, uma relação multivariada é efetivamente conferida por um sistema multidimensional real e aberto, no qual analisa-se todo o conjunto de variáveis e suas interações (JESUS, 2017). Segundo Parent et al. (2009), o emprego da transformação *clr* possibilita a atribuição do mesmo peso às carências e aos excessos no desequilíbrio nutricional, sendo estes detectados pela distância de Mahalanobis (DM). Diante disso, a transformação logarítmica *clr* tem sido a mais utilizada na maioria dos estudos de diagnose nutricional com o CND (PARENT et al., 1993; SILVA et al., 2004; SERRA et al., 2010ab; MORAIS et al., 2019; ROZANE et al. 2020; SILVA e CHIAIA, 2021). Entretanto, essa abordagem apresenta algumas limitações. Uma delas é que, mesmo a *clr* preservando a distância Euclidiana, o valor de complemento R não é incluso na elaboração da matriz para os cálculos da DM, resultando em redundância de informações (MODESTO et al., 2014). A outra é a inexistência de um modelo subjacente para a interpretação das interações nutricionais (PARENT, 2011), sendo necessária a aplicação de outras metodologias para essa finalidade, como a análise de componentes principais.

A transformação *ilr*, proposta por Egozcue et al. (2003), também utiliza a média geométrica da composição nutricional. Trata-se de uma modificação da abordagem *clr*, sendo mais abrangente e eficiente na interpretação do estado nutricional da planta (PARENT, 2011). No cálculo da *ilr*, um coeficiente de projeção dos dados composicionais em um espaço Euclidiano é aplicado. Nesse sentido, realiza-se a transformação de balanços ortogonais em ortonormais, também chamados de coordenadas geométricas, resultando em um sistema de relação binária com subcomposições ou subconjuntos de variáveis (Parent et al., 2013). De acordo com PARENT (2011) a transformação *ilr*, além de se encaixar bem na geometria Euclidiana, tem a capacidade de demonstrar as relações dos nutrientes de forma binária, permitindo avaliar a

interação entre eles em grupos de nutrientes (balanços). Assim, esta metodologia descreve o conjunto analisado incorporando todas as variáveis, inclusive o valor de complemento R.

Alguns estudos têm utilizado a transformação *ilr* nos cálculos do CND para a diagnose nutricional das culturas e a avaliação da interação dos nutrientes (HERNANDES, 2012; PARENT et al., 2013; NOWAKI et al., 2017; PAULA et al., 2020). Parent et al. (2013), avaliando o status nutricional da mangueira, utilizaram a transformação *ilr* para avaliar a interação dos nutrientes em subconjuntos de dados composicionais, sendo eles: 1) macronutrientes aniônicos (N, P e S); 2) macronutrientes catiônicos (K, Ca e Mg); 3) macronutrientes aniônicos de acordo com a síntese proteica (N e S) versus energia (P); 4) macronutrientes catiônicos: íons monovalentes versus divalentes; entre outros. Os autores concluíram que as variáveis *ilr* integram um diagnóstico estatístico com o balanço nutricional, avaliando as concentrações de nutrientes de forma unificada e coerente e, dessa forma, evitando interpretações conflitantes de concentrações e proporções de nutrientes quando os mesmos são avaliados separadamente. Nowaki (2017) comparou as transformações *clr* e *ilr* na avaliação nutricional do tomateiro utilizando o método CND. Neste trabalho, o autor verificou que as DM obtidas para ambas as transformações foram idênticas ( $r=1$ ) e que não houve diferença significativa ao comparar as duas metodologias.

As transformações logarítmicas propostas para o cálculo das variáveis multinutrientes do CND são obtidas pelas seguintes equações (PARENT et al., 2013) (Equações 1, 2 e 3)

$$alr_i = \ln \left( \frac{X_i}{X_{comum}} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: *alr* é a transformação logarítmica aditiva,  $X_i$  é o *i*-ésimo componente no numerador,  $i = [1...D]/i_{comum}$  e  $X_{comum}$  é o denominador comum para os componentes, resultando em  $D-1$  valor de *alr*, pois um componente no denominador é sacrificado.

$$clr_i = \ln \left( \frac{X_i}{G(x)} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

em que: *clr* é a transformação logarítmica centrada,  $X_i$  é o *i*-ésimo componente no numerador,  $G(x)$  é a média geométrica composicional de todos os componentes, resultando em  $D$  valores de *clr*, ou seja, existe um grau de liberdade extra para uma matriz de rank  $D-1$ .

$$ilr_i = \sqrt{\frac{n_i^+ n_i^-}{n_i^+ + n_i^-}} \ln \frac{G(X_i^+)}{G(X_i^-)} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:  $ilr_i$  é a transformação logarítmica isométrica, na  $i$ -ésima linha da partição binária sequencial  $n_i^+$  e  $n_i^-$  são os números dos componentes nos subgrupos positivos e negativos, respectivamente,  $G(X_i^+)$  é a média geométrica composicional dos componentes do subgrupo positivo e  $G(X_i^-)$  é a média geométrica composicional dos componentes do subgrupo negativo. O logarítmico natural das médias geométricas é um contraste. O coeficiente associado a  $\sqrt{\frac{n_i^+ n_i^-}{n_i^+ + n_i^-}}$  é um coeficiente ortogonal e representa o equilíbrio entre o número de componentes nos grupos positivos e negativos.

Dentre essas metodologias propostas para o cálculo das variáveis multinutrientes verifica-se que as transformações  $clr$  e  $ilr$  são, atualmente, as mais utilizadas em trabalhos que aplicam o CND como método de diagnose nutricional. Entretanto, mesmo que transformação  $ilr$  tenha se mostrado vantajosa em relação a  $clr$ , muitos estudos ainda se utilizam desta última para a avaliação do estado nutricional das culturas, até mesmo porque, as variáveis multinutrientes obtidas por essa transformação são invariantes em escala (fator de correção comum  $G(x)$ ) e são estimativas linearizadas, ou seja, estimativas não distorcidas dos componentes originais (PARENT et al., 1994b).

O uso de uma ou outra transformação logarítmica para a obtenção das variáveis multinutrientes do CND irá depender do prévio conhecimento do pesquisador em relação a interação entre os nutrientes, considerando a função de cada um deles na planta, seja ela metabólica ou estrutural. O mesmo é válido para a interação dos nutrientes em condições de solo. Ademais, a escolha de qual transformação logarítmica que deve ser utilizada depende, principalmente, do objetivo do estudo ou do interesse em obter informações complementares, além daquelas que já são rotineiras ao realizar o monitoramento nutricional das lavouras.

### 2.6.2. Índices CND

Os índices CND ( $IV_i$ ) indicam os desvios padronizados em relação aos valores de referência (CAMACHO et al., 2012). Assim, eles são calculados como uma distância padronizada entre

as variáveis multinutrientes de uma amostra independente e as médias das variáveis multinutrientes e os desvios-padrão de uma população de referência, ou seja, as normas.

A primeira etapa do cálculo  $IV_i$  é obter as variáveis multinutrientes para cada amostra independente. Para isso, deve-se realizar o mesmo procedimento adotado para o cálculo das variáveis multinutrientes que compõe as normas, ou seja, calcula-se os valores de R e de G(x), para posteriormente aplicar a transformação logarítmica das concentrações dos nutrientes, corrigindo-as por G(x). De posse dos valores de  $V_i$  para cada nutriente da amostra independente, os índices CND são obtidos da seguinte forma (Equação 4):

$$IV_i = \left( \frac{V_i - V_i^*}{S_d^*} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:  $IV_i$  é o índice CND,  $V_i$  é a variável multinutriente da amostra independente,  $V_i^*$  é a média das variáveis multinutrientes da norma e  $S_d^*$  é o desvio padrão das variáveis multinutrientes da norma.

A partir dos valores de  $IV_i$  para cada nutriente em cada amostra independente é possível obter várias informações sobre o estado nutricional da cultura em estudo, como os nutrientes que podem estar limitando a produtividade, seja por deficiência ou excesso, bem como a sua classificação em ordem de limitação. Além disso, é possível avaliar as intensidades de deficiência ou excesso para cada um dos nutrientes, verificar o grau de balanço e equilíbrio nutricional das lavouras, obter curvas de resposta potencial relacionando os índices CND à produtividade ou, até mesmo, com os teores dos nutrientes, além de avaliar a resposta dessas lavouras à adubação.

## 2.7. Interpretação dos índices CND

Os cálculos dos índices CND não é suficiente para avaliar o estado nutricional de uma lavoura. Para que a diagnose ocorra de forma correta é necessário que os índices sejam adequadamente interpretados objetivando identificar os nutrientes limitantes dos não-limitantes. Nesse sentido, a interpretação dos índices CND é semelhante à realizada no DRIS, em que índices negativos indicam nutrientes deficientes, índices positivos indicam nutrientes

em excesso e índices nulos indicam suficiência dos nutrientes (SILVA, 2001; KURIHARA, 2004; MORAIS et al., 2019; SILVA e CHIAIA, 2021).

Os índices CND gerados para cada nutriente são índices padronizados e sem unidade que represente diferença entre as variáveis multinutrientes da amostra independente em relação ao ótimo, ou seja, quando  $IV_i = 0$ . Assim, um valor positivo indica uma concentração relativa do nutriente maior do que a concentração relativa desse mesmo nutriente na população de referência e pode ser interpretado como suficiência ou excesso. Já um valor negativo indica uma concentração relativa do nutriente inferior à norma e é interpretado como deficiência (DOUCET, 1997). Essa interpretação quanto aos valores dos índices também possibilita ordená-los quanto ao grau de limitação na planta, ou seja, ordenar os nutrientes desde o mais limitante até o menos limitante ou suficiente.

Segundo Silva (2001), mesmo que a ordem de limitação seja obtida de acordo com os valores dos índices, positivos ou negativos, essa forma de interpretação dá visibilidade apenas qualitativa ao desequilíbrio nutricional, sendo necessário também a identificação quantitativa desse equilíbrio. Esta, refere-se à intensidade com que cada nutriente contribui para o desequilíbrio nutricional, sendo dada pela magnitude do afastamento do índice em relação ao valor ideal, que para o CND é zero.

Além de indicarem o estado nutricional da lavoura de forma qualitativa e quantitativa, os índices CND também permitem obter informações complementares que auxiliam na diagnose nutricional da cultura em estudo. Dentre as avaliações que podem ser realizadas, uma delas é verificar o grau de equilíbrio da amostra independente por meio de índices de equilíbrio nutricional. Estes, por sua vez, podem ser obtidos pelo somatório dos índices ao quadrado (CND  $r^2$ ) (KHIARI et al., 2001ac; ROZANE et al., 2020), pelo somatório em módulo dos índices, que em alguns estudos são denominados de Índices de Balanço Nutricional (IBN) (SILVA et al., 2017; ROCHA, 2020; SILVA et al., 2020) e em outros são denominados de Índices de Equilíbrio Nutricional (IEN) (SILVA et al., 2004; BAHIA, 2021) e, pelo somatório em módulo dos índices dividido pelo número total de nutrientes envolvidos na análise (d), sendo este último denominado de Índice de Equilíbrio Nutricional Médio (IEN<sub>m</sub>) (SILVA et al., 2004, BAHIA, 2021). Os CND  $r^2$ , IBN ou IEN e o IEN<sub>m</sub> são obtidos pelas seguintes equações (Equações 5, 6 e 7):

$$CND r^2 = (IV_N)^2 + (IV_P)^2 + (IV_K)^2 + \dots + (IV_d)^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:  $CND r^2$  é o índice de equilíbrio nutricional,  $IV_N$ ,  $IV_P$  e  $IV_K$  são os índices dos nutrientes N, P e K, respectivamente,  $IV_d$  é o índice  $CND$  do último nutriente em análise,  $d$  é o número de nutrientes avaliados.

$$IBE \text{ ou } IEN = |IV_N| + |IV_P| + |IV_K| + \dots + |IV_d| \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:  $IBN$  é o índice de balanço nutricional,  $IEN$  é o índice de equilíbrio nutricional,  $IV_N$ ,  $IV_P$  e  $IV_K$  são os índices dos nutrientes N, P e K, respectivamente,  $IV_d$  é o índice  $CND$  do último nutriente em análise,  $d$  é o número de nutrientes avaliados.

$$IEN_m = \frac{|IV_N| + |IV_P| + |IV_K| + \dots + |IV_d|}{d} \quad (\text{Eq. 7})$$

em que:  $IEN_m$  é índice de equilíbrio nutricional médio,  $IV_N$ ,  $IV_P$  e  $IV_K$  são os índices dos nutrientes N, P e K, respectivamente,  $IV_d$  é o índice  $CND$  do último nutriente em análise,  $d$  é o número de nutrientes avaliados.

Os valores dos índices de equilíbrio nutricional, independentemente do método utilizado para obtê-los, permitem comparar todas as lavouras em estudo quanto ao seu grau de desequilíbrio nutricional. Assim, quanto maior o valor do índice, maior é o desequilíbrio nutricional e quanto menor ou mais próximo de zero é o valor do índice significa que a lavoura avaliada encontra-se equilibrada nutricionalmente e conseqüentemente, maior é a probabilidade de resultar em elevadas produtividades. Uma vantagem dos  $CND r^2$  é que eles apresentam distribuição qui-quadrado, sendo um modelo de suporte genérico para pequenos bancos de dados (KHIARI et al., 2001a).

Quanto as denominações  $IBE$  ou  $IEN$ , mesmo que ambas produzam o mesmo resultado e a mesma forma de interpretação, vale ressaltar que há diferenças quanto ao significado de balanço e equilíbrio nutricional. O balanço nutricional possui caráter quantitativo, ou seja, refere-se ao grau de saciedade da “fome” da planta em relação ao nutriente (o quanto do nutriente é demandado pela planta). Já o equilíbrio nutricional refere-se à qualidade da dieta, ou seja, considera as interações entre os nutrientes (MENDONÇA, 2016). Portanto, como o  $CND$  é uma abordagem multinutriente, que leva em consideração a interação entre todos os nutrientes em

análise, o que é avaliado é o grau de equilíbrio nutricional. Diante disso, a denominação IEN se torna mais coerente de ser utilizada.

Adicionalmente a avaliação do grau de equilíbrio das lavouras, o CND também permite a avaliação do grau de balanço das mesmas, tendo como referência a média geométrica composicional  $G(x)$ . Esta última reflete o grau de balanço das populações em diagnose ao comparar os valores de  $G(x)$  com um (1,0). Assim, as populações apresentam, em termos relativos, diluição dos nutrientes se  $G(x) < 1$ , balanço adequado se  $G(x) = 1$ , e concentração dos nutrientes se  $G(x) > 1$  (SILVA, 2001). Nesse contexto, verifica-se que tanto os índices CND quanto  $G(x)$  podem ser avaliados e, quando interpretados de forma adequada maior a probabilidade de se obter um diagnóstico nutricional mais completo e consistente.

O  $IEN_m$  além de informar quanto ao grau de equilíbrio da lavoura, também pode ser utilizado para avaliar o Potencial de Resposta à Adubação (WADT, 1996, SILVA et al., 2004, ROCHA, 2020). A incorporação deste em uma diagnose nutricional permite separar os nutrientes em cinco classes de resposta à adubação, como proposto por Wadt (1996):

- 1) **Classe (p) – resposta positiva:** alta probabilidade de resposta positiva à adubação, nutriente encontra-se deficiente em alta intensidade.
- 2) **Classe (pz) – resposta positiva a nula:** média probabilidade de resposta positiva, nutriente encontra-se deficiente, porém em pouca intensidade.
- 3) **Classe (z) – resposta nula:** equilibrado, nutriente encontra-se na faixa ótima.
- 4) **Classe (nz) – resposta negativa a nula:** média probabilidade de resposta negativa, nutriente encontra-se em excesso, porém em baixa intensidade.
- 5) **Classe (n) – resposta nula:** alta probabilidade de resposta negativa, nutriente encontra-se em excesso em alta intensidade.

Os nutrientes são classificados quanto ao potencial de resposta à adubação em uma dessas cinco classes de acordo com alguns critérios estabelecidos, os quais comparam o valor dos índices CND em relação ao ótimo, que para CND é zero e, em relação ao valor do  $IEN_m$  (Tabela 2).

Tabela 2: Critérios para separação dos nutrientes em classes potencial de resposta à adubação, de acordo com os índices CND

| Estado Nutricional | Classes de PRA | Critérios        |                  |                                      |
|--------------------|----------------|------------------|------------------|--------------------------------------|
|                    |                | 1                | 2                | 3                                    |
| Deficiente         | p              | $IV_i < 0$       | $ IV_i  > IEN_m$ | $IV_i = \text{menor índice}$         |
| Pouco deficiente   | pz             | $IV_i < 0$       | $ IV_i  > IEN_m$ | $IV_i = \text{não é o menor índice}$ |
| Equilibrado        | z              | $ IV_i  < IEN_m$ | -----            | -----                                |
| Em excesso         | nz             | $IV_i > 0$       | $ IV_i  > IEN_m$ | $IV_i = \text{não é o maior índice}$ |
| Excesso elevado    | n              | $IV_i > 0$       | $ IV_i  > IEN_m$ | $IV_i = \text{maior índice}$         |

PRA = potencial de resposta à adubação; p= resposta positiva; pz = resposta positiva a nula; z = resposta nula; zn = resposta negativa a nula; n = resposta negativa;  $IV_i$  = índices CND;  $IEN_m$  = índice de equilíbrio nutricional médio.

Fonte: Adaptado Rocha (2020)

Silva et al. (2004) avaliando o estado nutricional de povoamentos de eucalipto na região Centro-Leste de Minas Gerais pelos métodos DRIS, M-DRIS e CND, incorporaram o conceito do potencial de resposta à adubação para os índices obtidos em cada uma destas metodologias utilizando o  $IEN_m$ . Os autores verificaram que a potencial de resposta à adubação permitiu que os resultados obtidos em cada um desses métodos fossem comparados e que a incorporação desse conceito nos índices CND permitiu melhor separação dos nutrientes limitantes por falta, não-limitantes e limitantes por excesso. Rocha (2020) avaliou o estado nutricional de povoamentos jovens de eucalipto na Amazônia Oriental, também incorporando o conceito do potencial de resposta à adubação aos índices CND. Neste estudo, o autor verificou que entre os nutrientes avaliados N, P, K, Ca e Mg grande parte dos talhões apresentava resposta nula à adubação para todos eles, variando de 65,52% para Ca e 89,66% para o P. O K foi classificado na classe de resposta positiva para 17,34% dos talhões, sendo o nutriente com maior frequência nessa classe. Já para a classe de resposta negativa, o Mg foi o nutriente que se destacou, sendo incluído nesta classe em 20,69% dos talhões.

Outra informação importante que é possível obter através dos índices CND é a forma como os nutrientes estão interagindo na população diagnosticada. Sabe-se que a diagnose nutricional realizada por este método considera a interação entre todos os nutrientes, porém, a interpretação qualitativa e quantitativa obtida ao analisar os valores dos índices CND não permite verificar se a deficiência ou o excesso de determinado nutriente está ocorrendo por influência de um ou mais nutrientes. A interação entre eles, seja ela, positiva ou negativa, ocorre quando a adição de um nutriente provoca o aumento ou a redução da resposta de um segundo elemento. Se a adição de dois nutrientes supera a soma das respostas individuais a ambos, quando estes são aplicados isoladamente há um efeito sinérgico e, se o resultado é inferior, o efeito é antagônico (CANTARELLA, 2007). Nesse contexto, os nutrientes interagem entre si por meio de relações

sinérgicas (positivas) e antagônicas (negativas). Assim, o CND permite verificar essas interações utilizando os índices CND em análises multivariadas, como a ACP (PARENT et al., 1994ab; RAGHUPATHI et al., 2002; ANJANEYULU et al., 2008; EL KADRI, JESUS, 2017; GARBA et al., 2018; GEIKLOOI et al., 2021).

Raghupathi et al. (2002), realizando a diagnose nutricional em diferentes cultivares de banana utilizaram a ACP nos índices CND a fim de verificar a forma de interação dos nutrientes na cultura. Os autores observaram que os nutrientes N, P e K foram correlacionados positivamente, enquanto Ca e Mg negativamente, sendo designado como (N+P+K-Ca-Mg-). Este resultado indica que N, P e K (nutrientes altamente móveis) se comportaram em uma direção, enquanto Ca e Mg (nutrientes relativamente imóveis) na direção oposta. Esses resultados levaram à conclusão de que a aplicação de N e K em doses maiores e em menor intervalo resultaram em maior desequilíbrio de nutrientes na banana. P e Zn foram os nutrientes limitantes de rendimento mais comuns, devido aos desequilíbrios de N e K. As aplicações fracionadas de N e K em doses mais altas não têm efeito benéfico sobre o balanço de nutrientes ou a produção de frutos em bananeira. Ali (2018), objetivando avaliar a interação entre os nutrientes na cultura da manga, utilizou a ACP nos índices CND obtendo sete interações fortemente evidenciadas, sendo interação sinérgica entre P e K e antagônica entre P e Mg, K e Mg, Ca e Zn, P e Fe, K e Fe e Zn e Cu. Geiklooi et al. (2021) avaliaram a interação dos nutrientes na cultura do trigo através da ACP nos índices CND, verificando interações positivas e significativas entre os nutrientes. Os autores investigaram, ainda, as cargas fatoriais da análise considerando três conjuntos de dados (população de alta produtividade, população de baixa produtividade e toda a população) e constataram que houve interações negativas entre macronutrientes e micronutrientes.

Diante do exposto, fica evidente a importância dos índices CND para a avaliação do estado nutricional das plantas. Obtendo-se esses índices, várias informações são extraídas através da sua interpretação. Assim, a diagnose nutricional através do CND permite identificar nutrientes deficientes, suficientes ou em excesso, o grau de equilíbrio nutricional da população avaliada e como estes nutrientes estão interagindo uns com os outros. Essas informações são essenciais, pois, podem auxiliar o produtor a ajustar o seu manejo nutricional, de forma a corrigir adubações inadequadas e, conseqüentemente, aumentar a probabilidade de alcançar maiores produtividades.

## 2.8. Vantagens do CND

O CND se destaca dentre os métodos de diagnose nutricional, principalmente pela sua abordagem multivariada, que permite avaliar a interação entre todos os nutrientes e não apenas as interações entre um nutriente em relação a outro (relações duais) ou o seu efeito isolado. Assim, o CND pode ser considerado um progresso quando comparado aos métodos univariados (NC) e bivariados (DRIS). Isso porque, o CND leva em consideração todas as possíveis interações entre os nutrientes, reconhecendo aquelas de alta ordem, as quais, o nível crítico não consegue explicar e que foram parcialmente abordadas pelo DRIS (PARENT e DAFIR, 1992). Dentre essas interações, pode-se destacar os efeitos de sinergismo, antagonismo, diluição e concentração dos nutrientes no tecido.

Como o CND é uma expansão do método DRIS as vantagens deste último também podem ser aplicadas ao CND. Ambos os métodos permitem identificar os nutrientes deficientes ou em excesso que possam estar limitando a produtividade, verificar os casos de desequilíbrios nutricionais mesmo que nenhum nutriente esteja abaixo ou acima do teor ótimo, hierarquizar os nutrientes quanto a sua ordem de limitação e, ainda, permitem obter um índice de equilíbrio nutricional (SILVA, 2001). Além disso, tanto os índices DRIS quanto os índices CND também permitem a obtenção de faixas de suficiência nutricional, curvas de reposta potencial nutrientes específicas e análise da probabilidade de resposta à adubação (SILVA et al., 2004; SERRA et al., 2010a, SILVA et al., 2017; ROZANE et al., 2020, BAHIA, 2021). Diante dessas vantagens citadas para os dois métodos, percebe-se que ao utilizá-los em uma avaliação nutricional há maior probabilidade de se obter informações mais concretas quanto ao estado nutricional da cultura e, conseqüentemente, realizar ajustes no manejo nutricional a fim de alcançar maiores produtividades.

Em contrapartida, o CND possui outras vantagens que fazem com que o método seja considerado superior ao DRIS e, também a outros métodos. Uma delas é a obtenção do índice de desequilíbrio nutricional por meio da soma dos valores quadrados dos índices CND ( $CND\ r^2$ ). A vantagem em se obter o  $CND\ r^2$  é que ele pode ser distribuído como uma função qui-quadrada, podendo servir como modelo de suporte genérico para pequenos bancos de dados (KHIARI et al., 2001ac).

Outro ponto positivo do CND é a facilidade dos seus cálculos. Para a diagnose realizada por este método necessita-se apenas calcular o valor de complemento (R), a média geométrica composicional  $G(x)$ , as variáveis multinutrientes ( $V_i$ ) e os índices CND ( $IV_i$ ). Dessa forma, não

é necessário calcular e padronizar razões duplas dos nutrientes antes de calcular os índices, como é feito para DRIS (PARENT et al., 1994b). Ademais, as equações para obter as variáveis do CND são simples, requerem menor esforço computacional e possibilitam otimizar as análises, principalmente quando se utiliza grandes bancos de dados. Nesse sentido, outra vantagem deste método que merece destaque é sua independência quanto a implantação de experimentos de calibração, pois as relações multivariadas minimizam os efeitos não controlados da taxa de acúmulo de biomassa (WADT, 2011; CAMACHO et al., 2012), indicando que o CND pode ser devidamente aplicado em monitoramento nutricional de campos comerciais.

A possibilidade de uso do CND em análises multivariadas é outra grande vantagem deste método. Segundo Parent e Natale (2008), as variáveis multinutrientes do CND tem acesso aos recentes instrumentos de análise multivariada, como a ACP, a análise canônica, a análise composicional e ao cálculo da distância simplicial (distância entre dois *simplex* ( $S^d$ )). Dentre estas, a que tem sido mais utilizada nos estudos com o CND é a ACP (PARENT et al. 1994ab; ANJANEYULU et al., 2008; EL KADRI, 2017; GARBA et al., 2018; GEIKLOOI et al., 2021). A aplicação desta multivariada em índices CND permite verificar como os nutrientes estão interagindo, se há efeito positivo ou negativo, permitindo fazer inferências quanto ao estado do nutriente, ou seja, se o mesmo encontra-se em deficiência ou excesso, devido à sua disponibilidade no solo ou em razão da presença de outro nutriente.

Diante do exposto, fica evidente a superioridade do CND, quando comparado aos outros métodos de diagnose nutricional, indicando que sua aplicação para avaliar o estado nutricional das culturas pode resultar em diagnósticos que auxiliam nas tomadas de decisão em relação ao gerenciamento das lavouras e conseqüentemente para a obtenção de maiores produtividades.

## **2.9. Considerações finais**

O CND é um método de interpretação de diagnose nutricional que foi recentemente desenvolvido a fim de inovar e aprimorar as diagnoses realizadas por outros métodos como o NC, KW, DRIS, entre outros. Estudos realizados com estes últimos ao longo dos anos verificaram que métodos estáticos, como o NC, são capazes de avaliar apenas o teor de determinado nutriente na planta de forma isolada, não sendo possível verificar a interação que ocorre entre os nutrientes. Por outro lado, com o desenvolvimento do DRIS esse problema foi

parcialmente resolvido, uma vez que este considera a interação entre dois elementos, as chamadas relações duais.

Contudo, sabe-se que os nutrientes interagem entre si, tanto na planta quanto no solo, com efeitos positivos (sinérgicos) e negativos (antagônicos), podendo também ser encontrados nos tecidos das plantas de forma diluída ou concentrada. O conhecimento sobre as interações multinutrientes, e não apenas duais, é essencial para verificar o desequilíbrio nutricional das lavouras e avaliar a influência deste desequilíbrio na produtividade, evidenciando os nutrientes limitantes, não limitantes e a forma de interação entre eles. Assim, a metodologia proposta pelo CND é capaz de abordar essas interações multinutrientes, além de ser o único método compatível com as análises multivariadas, principalmente com a ACP. A aplicação do CND, juntamente com a ACP, resulta em informações importantes sobre a interação entre os nutrientes, como por exemplo, se a presença de um elemento em maiores quantidades interfere na absorção ou no teor de outro elemento na planta. Este tipo de análise permite, também, verificar a interação entre grupos de elementos como macronutrientes versus micronutrientes, ânions versus cátions, entre outras relações.

A interação dos nutrientes pelo CND também pode ser avaliada utilizando a transformação isométrica (*ilr*) dos dados ao invés da transformação de razão centrada (*clr*). Na transformação isométrica as análises são realizadas por subconjuntos (avaliações binárias) a depender do objetivo do estudo. Alguns trabalhos têm demonstrado resultados mais precisos utilizando a *ilr*, porém, esta abordagem depende do conhecimento prévio do pesquisador quanto as relações entre os nutrientes e, como é uma abordagem relativamente nova, recomenda-se a realização de mais estudos que utilize a *ilr* e a compare com a *clr*.

O enfoque multivariado do CND permite obter uma diagnose nutricional mais precisa e consistente, pois, quando toda a estrutura de variação da composição nutricional é considerada, como é feito neste método, há superioridade na consistência das análises de tecido. A aplicação do CND permite, ainda, identificar os nutrientes limitantes, não limitantes e suficientes; ordená-los quanto ao grau de limitação; calcular um índice de desequilíbrio nutricional e, por meio deste, comparar as lavouras desequilibradas nutricionalmente. Ademais, os cálculos necessários para a obtenção das variáveis multinutrientes e dos índices CND são fáceis de serem realizados e trata-se de um método que não depende de experimentos de calibração nutricional.

Mesmo com tantas vantagens no seu uso, o CND apresenta algumas limitações. Uma delas é que a análise por este método só é permitida em lavouras que contém a informação dos teores de todos os nutrientes em diagnose, pois a ausência do teor de um dos elementos prejudica o cálculo da média geométrica composicional e, por essa razão, o banco de dados pode ser

reduzido. Outra limitação é a falta de informações quanto ao tamanho amostral ideal para o alcance de resultados com maior precisão e, por fim, a falta de estudos relacionando os resultados da diagnose nutricional pelo CND com a recomendação de adubação.

Diante do exposto, verifica-se que o CND tem grande potencial de uso na diagnose nutricional das culturas, podendo ser recomendado tanto para estudos com dados experimentais quanto para dados obtidos em campos comerciais. A avaliação do estado nutricional pelo CND é capaz de resultar em diagnósticos que podem ser essenciais no auxílio do gerenciamento das lavouras e nos ganhos em produtividade.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo e formação do banco de dados

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de plantios comerciais de eucalipto, de diversas empresas florestais, representativos de várias localidades do país (Tabela 3).

Tabela 3: Características das localidades dos plantios de eucalipto que compõe o banco de dados

| Localidade         | Estado | Altitude (m) | Coordenadas      |                   |
|--------------------|--------|--------------|------------------|-------------------|
|                    |        |              | Latitude         | Longitude         |
| Sul da Bahia       | BA     | 7 a 189      | 16° 22' a 18° 5' | 39° 34' a 39° 33' |
| Aracruz            | ES     | 69           | 19° 49' 12" S    | 40° 16' 22" O     |
| São Mateus         | ES     | 36           | 18°42'58" S      | 39°51'21" O       |
| Barão de Cocais    | MG     | 791          | 19° 56' 13" S    | 43° 28' 20" O     |
| Ibitira            | MG     | 657          | 19° 25' 03" S    | 45° 09' 11" O     |
| Buritizeiro        | MG     | 500          | 17° 21' 03" S    | 44° 57' 43" O     |
| Ipaba              | MG     | 213          | 19° 24' 50" S    | 42° 25' 08" O     |
| João Pinheiro      | MG     | 765          | 17° 44' 26" S    | 46° 10' 27" O     |
| Montes Claros      | MG     | 678          | 16° 44' 06" S    | 43° 51' 43" O     |
| Nova Era           | MG     | 526          | 19° 45' 00" S    | 43° 02' 16" O     |
| Rio doce           | MG     | 378          | 20° 14' 31" S    | 42° 54' 25" O     |
| Rio Pardo de Minas | MG     | 794          | 15° 36' 36" S    | 42° 32' 24" O     |
| Sabinópolis        | MG     | 707          | 18° 39' 57" S    | 43° 05' 02" O     |
| Santa Bárbara      | MG     | 732          | 19°57'34" S      | 43°24'55" O       |
| Três Marias        | MG     | 569          | 18° 12' 21" S    | 45° 14' 31" O     |
| Vale do Paraíba    | MG     | 567 a 600    | 23° 1' a 23° 18' | 45° 33' a 45° 57' |
| Virginópolis       | MG     | 743          | 18° 49' 22" S    | 42° 42' 14" O     |
| Três lagoas        | MS     | 319          | 20° 45' 04" S    | 51° 40' 42" O     |
| Telêmaco Borba     | PR     | 741          | 24° 19' 26" S    | 50° 36' 57" O     |
| Pelotas            | RS     | 7            | 31° 46' 19" S    | 52° 20' 34" O     |
| Agudos             | SP     | 580          | 22° 28' 08" S    | 48° 59' 16" O     |
| Botucatu           | SP     | 840          | 22° 53' 09" S    | 48° 26' 42" O     |
| Capão Bonito       | SP     | 730          | 24° 00' 21" S    | 48° 20' 58" O     |
| Itapetininga       | SP     | 670          | 23° 35' 30" S    | 48° 03' 11" O     |
| Lençóis paulistas  | SP     | 505          | 22° 35' 56" S    | 48° 48' 00" O     |
| Salto              | SP     | 555          | 23° 12'03" S     | 47° 17' 13" O     |

Os plantios comerciais de eucalipto abrangeram indivíduos entre 0,4 a 7,0 anos de idade. Por ser um estudo compreendendo vários estados brasileiros, estes apresentaram diferentes genótipos, espaçamentos e práticas silviculturais.

Para o diagnóstico nutricional desses plantios o banco de dados foi composto pelos teores foliares dos nutrientes e dos dados de crescimento das árvores. Os teores dos nutrientes foram determinados em amostras de folhas coletadas em cada talhão, seguindo a campanha de monitoramento nutricional realizado em cada empresa. As amostras foliares foram obtidas entre 10 a 15 árvores escolhidas aleatoriamente em cada talhão, sendo coletadas no terço médio da copa e no terço médio dos ramos. Posteriormente a coleta das amostras de folhas, as mesmas foram secas, moídas, mineralizadas e analisadas, conforme métodos rotineiros, obtendo-se os teores dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S e dos micronutrientes Cu, Fe, Zn, Mn e B. Já para os dados de crescimento as árvores foram medidas quanto à altura – H, em metros, e o diâmetro a altura do peito – *dap* (diâmetro a 1,30 m do solo), em centímetros.

Os dados referentes aos teores dos nutrientes foram submetidos a análise de consistência na primeira etapa do trabalho. Assim, foram considerados no trabalho os teores de nutrientes compreendidos no intervalo entre a média  $\pm$  cinco desvios-padrão. Além disso, para o emprego do método CND o banco de dados deve conter os teores de todos os nutrientes, em diagnóstico, em cada talhão. A ausência do teor de qualquer um dos nutrientes que estão sob diagnose inviabiliza a análise, uma vez que, para o cálculo de  $G(x)$  considera-se a interação entre todos os nutrientes e a falta de um deles pode resultar em um valor nulo. Como a transformação *clr* leva em consideração  $G(x)$ , este valor nulo impossibilita que esta transformação logarítmica seja realizada, visto que, não existe logarítmico de zero. Diante disso, também foi necessário remover do banco de dados talhões em que o teor de um ou mais nutrientes, sob diagnóstico, não foram determinados ou estavam ausentes. Após esta verificação, constavam 9530 registros de teores foliares na base de dados.

### **3.2. Estabelecimento da população de referência**

A população de referência foi obtida utilizando o método da linha de fronteira (GALDINO, 2015). Para isso, utilizou-se a altura para definir o crescimento das árvores nos talhões, pois, como os registros do banco de dados foram oriundos de diferentes empresas e conseqüentemente os povoamentos florestais compreendidos em diferentes espaçamentos, a variável altura tem menor influência do espaçamento que o *dap*. Além disso, o banco de dados

também era composto por dados de árvores muito jovens, em que, não é usual a mensuração do *dap*. Assim, os valores de alturas das árvores foram relacionados por meio de gráficos de dispersão em função das idades das árvores.

Na nuvem de pontos obtidas foram selecionados os pares (Idade (ano) e Altura (m)) correspondentes a fronteira superior do relacionamento (população de fronteira). As árvores que constituíam a população de fronteira superior (FS) foram utilizadas para compor a população de referência.

Logo após a obtenção da população de FS, isto é, a população de alta produtividade, foi obtida a estatística descritiva em relação à média, desvio padrão, coeficiente de variação, máximo e mínimo para os teores de todos os macros e micronutrientes e também para a variável altura. A estatística descritiva também foi obtida para a população de fronteira inferior (FI), ou seja, para a população compreendida abaixo da fronteira superior e que apresenta baixa produtividade, a fim de comparar a variabilidade dos teores nutricionais de ambas as populações.

### 3.3. Produtividade das árvores

Obtida a população FS, foram ajustadas equações de regressão relacionando a altura e idade das árvores compreendidas nessa população. A equação selecionada foi aquela que melhor se ajustava aos dados, pelos critérios: significância dos coeficientes da equação com base no Quadrado médio do Independente da Regressão, no significado biológico da equação e no coeficiente de determinação da regressão  $R^2$ .

Uma vez selecionadas as árvores da região FS, também foram obtidas equações para o *dap* destas árvores em função da idade.

O volume de tronco (madeira com casca), foi calculado, considerando toda a população. Entretanto, o mesmo foi obtido apenas para aquelas árvores em que o *dap* foi mensurado, utilizando-se a seguinte equação (Eq. 8):

$$V_T = \left( \pi * \frac{dap^2}{4} \right) * HT * f \quad (8)$$

em que,  $V_T$  é o volume de tronco e  $f$  é o fator de forma, considerado como 0,43. O fator de forma converte o volume cilíndrico que se obtém usando a altura ( $H$ ) e o diâmetro a 1,30 m de altura (*dap*) no volume sólido da árvore.

Posteriormente ao cálculo do  $V_T$ , equações de regressão também foram ajustadas para a variável volume utilizando os dados da FS. Os critérios para a seleção da melhor equação ajustada foram os mesmos utilizados para o ajuste das equações de altura e *dap*, ou seja, pela significância dos coeficientes da equação com base no Quadrado médio do Independente da Regressão, no significado biológico da equação e no coeficiente de determinação da regressão  $R^2$ .

A equação ajustada para volume na FS foi utilizada, ainda, para o cálculo do crescimento relativo em volume de tronco (CRV), ou seja, para comparar a proporção do crescimento em volume de toda a população em relação ao crescimento potencial em volume, sendo este último obtido pela equação ajustada para a população de máxima produtividade, isto é, pela FS. Diante disso, o CRV foi obtido pela relação entre o volume observado ( $V_O$ ) e o volume estimado pela equação ajustada para FS ( $V_{FS}$ ) (Eq. 9). Nesta avaliação considerou-se apenas os talhões em que as árvores tiveram o seu *dap* mensurado.

$$CRV (\%) = \frac{V_O}{\hat{V}_{FS}} * 100 \quad (9)$$

em que, CRV é o crescimento relativo em volume,  $V_O$  é o volume observado, obtido pela equação 8 e  $\hat{V}_{FS}$  é o volume estimado pela equação ajustada para volume na população FS.

O crescimento relativo também foi obtido para a variável altura (CRH) com o mesmo objetivo de verificar a proporção do crescimento em altura de toda população em relação ao crescimento potencial em altura, sendo este último obtido pela altura estimada pela equação ajustada para a população de máxima produtividade (FS) (Eq. 10):

$$CRH (\%) = \frac{H_O}{\hat{H}_{FS}} * 100 \quad (10)$$

em que, CRH é o crescimento relativo em altura,  $H_O$  é a altura observada, medida em campo e  $\hat{H}_{FS}$  é a altura estimada pela equação ajustada para altura utilizando a população FS.

### 3.4. Cálculo das Normas CND

Parent e Dafir (1992) aborda que a composição do tecido vegetal forma um *simplex* ( $S^d$ ), constituído por  $d+1$  proporções de nutrientes incluindo  $d$  nutrientes e um valor de complemento definido de acordo com a seguinte equação (Eq. 11):

$$S^d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P > 0, K > 0, \dots, R_d > 0, N + P + K + \dots + R_d = 1000] \quad (11)$$

em que, 1.000 é a concentração de matéria seca ( $\text{g kg}^{-1}$ );  $N, P, K, \dots$  são proporções de nutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ); e  $R_d$  é o valor de complemento entre 1.000 e a soma de  $d$  proporções de nutrientes calculadas por (Eq. 12):

$$R_d = 1000 - (N + P + K + \dots + X_d) \quad (12)$$

em que,  $R_d$  é o valor de complemento,  $N$  é o teor de nitrogênio,  $P$  é o teor de fósforo,  $K$  é o teor de potássio,  $X$  é o teor do último nutriente em análise,  $d$  é o número de nutrientes.

Posteriormente ao cálculo do  $R_d$ , calculou-se a média geométrica da composição nutricional  $G(x)$  dos componentes  $d+1$ , incluindo o valor de  $R_d$ . A  $G(x)$  é um fator de correção que torna as proporções de nutrientes invariantes em escala. Segundo Parent et al. (1995) uma proporção multinutriente é uma expressão para cada componente da planta em relação a todos os outros componentes, sendo assim,  $G(x)$  é obtida da seguinte forma (Eq. 13):

$$G(x) = (N * P * K * \dots * R_d)^{\frac{1}{d+1}} \quad (13)$$

em que,  $G(x)$  é a média geométrica composicional,  $N$  é o teor de nitrogênio,  $P$  é o teor de fósforo,  $K$  é o teor de potássio,  $R_d$  é o valor de complemento,  $d$  é o número de nutrientes.

As variáveis multinutrientes,  $V_N, V_P, V_K \dots V_{R_d}$ , são geradas a partir da transformação logarítmica centrada (*clr*) (Eq. 14):

$$V_{X_i} = \ln\left(\frac{X_i}{G(x)}\right) \quad (14)$$

em que,  $V_{x_i}$  é a variável multinutriente do  $X_i$  nutriente,  $X_i$  é o teor do nutriente,  $G(x)$  é a média geométrica composicional.

$$V_N + V_P + V_K + \dots + V_{R_d} = 0 \quad (15)$$

A operação realizada pela equação 15 é um controle para garantir que os cálculos das variáveis foram realizados corretamente. Por definição, a soma dos componentes teciduais é 1.000 (Eq. 12), e a soma das variáveis multinutrientes transformadas incluindo o valor de preenchimento deve ser zero.

As normas são definidas como a média de  $V_i$  e os desvios-padrão da população de referência e são diferenciadas nos cálculos pelo asterisco.

### 3.5. Cálculo dos Índices CND

O cálculo dos índices CND são realizados logo após a obtenção das normas, ou seja, das variáveis multinutrientes da população de referência. Seja  $V_N^*$ ,  $V_P^*$ ,  $V_K^*$ , ...,  $V_{R_d}^*$  e  $SD_N^*$ ,  $SD_P^*$ ,  $SD_K^*$ , ...,  $SD_{R_d}^*$  as médias e desvios padrões centrados de  $d$  nutrientes, respectivamente, os índices CND são as relações centradas dos dados de amostras independentes e são padronizados da seguinte forma (Eq. 16):

$$IV_i = \ln\left(\frac{V_i - V_i^*}{SD_i^*}\right) \quad (16)$$

em que,  $IV_i$  é o índice CND;  $V_i$  é a variável multinutriente da amostra sob diagnose (amostra independente);  $V_i^*$  é a média da variável multinutriente na população de referência e  $SD_{V_i}^*$  é o desvio-padrão da variável multinutriente na população de referência.

A transformação logarítmica centrada verifica a aditividade ou independência entre os dados de composição (AITCHISON, 1986). Os índices CND obtidos pela Eq. (16), são variáveis

padronizadas e linearizadas com dimensões de um círculo ( $d + 1 = 2$ ), uma esfera ( $d+1 = 3$ ) ou uma hipersfera ( $d + 1 > 3$ ) em um espaço dimensional  $d+1$ .

Obtidos os valores de  $IV_i$  foi calculado o Índice de Equilíbrio Nutricional Médio ( $IEN_m$ ), a partir do somatório, em módulo, dos índices CND de todos os nutrientes, excluindo o valor de complemento, e dividindo esse valor pelo número de nutrientes envolvidos na análise ( $d$ ) (Eq. 17):

$$IEN_m = \frac{|IV_N| + |IV_P| + |IV_K| + \dots + |IV_d|}{d} \quad (17)$$

em que:  $IEN_m$  é o índice de equilíbrio nutricional médio e  $d$  é o número de nutrientes na análise.

Quanto maior o valor do  $IEN_m$ , maior o desequilíbrio nutricional da amostra independente.

### 3.6. Diagnose Nutricional e Potencial de Resposta à Adubação

A diagnose do estado nutricional é realizada na subpopulação de baixa produtividade, ou seja, para aquelas populações não incluídas na região de FS, também denominada de amostra independente.

A avaliação do estado nutricional das amostras independentes é realizada a partir dos valores de  $IV_i$ . Semelhante ao preconizado pelo DRIS, o CND também considera que lavouras balanceadas e equilibradas nutricionalmente são aquelas com valores de índices próximos ou iguais a zero. Diante disso, índices negativos indicam nutrientes deficientes e valores de índices positivos indicam nutrientes em excesso. Esta avaliação, proporciona uma classificação qualitativa dos índices. Já a classificação quantitativa refere-se à intensidade com que cada nutriente contribui para o desequilíbrio, ou seja, ela é indicada pelo afastamento em relação ao valor ideal, que para o CND é zero. Assim, a classificação quantitativa é dada pela magnitude do valor do índice CND, em módulo, em relação ao valor zero.

De posse dos valores de  $IV_i$ , os nutrientes foram indicados como deficientes ou em excesso e posteriormente realizada a classificação da ordem de limitação dos mesmos para cada amostra independente.

De acordo com os valores de  $IV_i$  os talhões de baixa produtividade foram avaliados quanto à frequência em que se enquadravam nas seguintes situações: (A) menor que zero, (B) o menor índice, (C) o maior índice, (D) maior (em módulo) que o ( $IEN_m$ ).

O conceito de Potencial de Resposta à Adubação (PRA) (WADT, 1996), também foi incorporado para a interpretação dos índices CND (Tabela 4). Para isso, nos talhões de baixa produtividade, os nutrientes, em cada localidade, foram inicialmente classificados segundo o PRA em respostas: positiva (p), positiva a nula (pz), nula (z), negativa a nula (nz) e negativa (n). Posteriormente, visando maior síntese, foi feito o agrupamento das duas primeiras e das duas últimas classes de resposta, nas classes de *status* nutricional, isto é, limitante por falta (LF) e limitante por excesso (LE), conseqüentemente, a resposta nula deu origem à classe não-limitante (NL).

Tabela 4: Interpretação dos índices CND, em função das classes de *status* nutricional

| Índice | Módulo do índice | + LF<br>(menor índice)* | + LE<br>(maior índice)* | PRA | Classe de status nutricional |
|--------|------------------|-------------------------|-------------------------|-----|------------------------------|
| < 0    | > IENm           | sim                     | não                     | p   | LF                           |
| < 0    | > IENm           | não                     | não                     | pz  | LF                           |
| > 0    | > IENm           | não                     | sim                     | n   | LE                           |
| > 0    | > IENm           | não                     | não                     | nz  | LE                           |
| ≤ 0    | ≤ IENm           | independente            | independente            | z   | NL                           |
| ≥ 0    | ≤ IENm           | independente            | independente            | z   | NL                           |

\* em módulo; PRA = Potencial de resposta à adubação; IENm = índice de equilíbrio nutricional médio; + LF = o mais limitante por falta; + LE = o mais limitante por excesso; positiva (p); positiva ou nula (pz); negativa (n); negativa ou nula (nz) e nula (z); LF = limitante por falta; LE = limitante por deficiência; NL = não-limitante.

A validação da diagnose foi realizada pelo teste de independência utilizando o teste de qui-quadrado ( $X^2$ ) ( $p < 0,01$ ) (WADT et al., 1998b). Considerou-se como hipótese nula que a frequência com que cada nutriente ocorreu como limitante primário por falta, ou seja, com PRA positiva e de alta probabilidade, foi atribuída ao acaso.

A frequência esperada (FE) foi igual ao número total de observações, dividido pelo total de nutrientes analisados. A frequência observada (FO) foi a contagem do número de vezes em que cada nutriente ocorreu como o mais limitante por falta.

### 3.7. Curvas de Resposta Potencial Nutrientes Específicas

As curvas de resposta potencial nutrientes específicas (CRPNE) foram obtidas utilizando o método da linha de fronteira (GALDINO, 2015). Para isso, os valores obtidos para os CRV (Eq. 9) e CRH (Eq. 10) foram relacionados por meio de gráficos de dispersão em função dos índices CND.

Na nuvem de pontos obtidas foram selecionados os pares ( $IV_i$  e CRH (%)) - para as curvas que consideraram o crescimento relativo em altura) e os pares ( $IV_i$  e CRV (%)) - para as curvas

que consideraram o crescimento relativo em volume), correspondentes a FS do relacionamento. Estes pontos selecionados foram submetidos à análise pela regressão polinomial de 2º grau e pela regressão duplo linear com resposta platô (RDLP) (Eqs. 18 e 19):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon \quad (18)$$

em que Y é o crescimento relativo estimado para altura ou volume, X são os índices CND,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os parâmetros do modelo,  $\varepsilon$  é o erro associado.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 D1(X - K1) + \beta_3 D2(X - K2) + \varepsilon \quad (19)$$

em que Y é o crescimento relativo estimado para altura ou volume, X são os índices CND, K1 e K2, são os valores dos índices CND limites, sendo o limite inferior e superior do platô, respectivamente, D1 e D2 são as variáveis dummy,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os parâmetros do modelo,  $\varepsilon$  é o erro associado.

As melhores equações para ambas as regressões foram selecionadas com base, na significância de seus coeficientes e no coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Selecionada a melhor equação dos crescimentos relativos (CR) para altura e volume foram estabelecidas as faixas de suficiência (FSU) para os índices CND, utilizando as seguintes classes: deficiente ( $CR < 70\%$ ), tendência a deficiente ( $70\% \leq CR < 90\%$ ), suficiente ( $90\% \leq CR < 100\%$ ), alto ( $100\% \leq CR < 90\%$  a direita), tendência a excesso ( $90\% \leq CR < 70\%$  a direita), excesso ( $CR \leq 70\%$  a direita)

Posteriormente, para uma maior síntese do diagnóstico nutricional dos plantios de eucalipto, pelas FSU as duas primeiras e as duas últimas classes foram agrupadas e calculou-se as frequências de talhões que se enquadravam nas quatro novas classes: limitante por falta ( $CR < 90\%$ ), Suficiente ( $90\% \leq CR < 100\%$ ), Alta ( $100\% \leq CR < 90\%$  a direita) e limitante excesso ( $CR \leq 90\%$  a direita).

### 3.8. Análises computacionais

Os procedimentos para a obtenção da região de fronteira tanto para o estabelecimento da população de referência quanto para a geração CRPNE, foram realizados com o auxílio do aplicativo computacional “Boundary Fit”, desenvolvido na UFV.

Os cálculos das variáveis multinutrientes, dos índices CND e para o potencial de resposta à adubação foram realizados com o auxílio do Excel 10.0.

As equações de regressão foram ajustadas com o auxílio do software Statistica 10 (Statsoft, 2010).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Estabelecimento da população de fronteira**

A base de dados foi composta por 9530 registros, sendo que 78 deles descreveram a região FS. Estes, foram constituídos por árvores de plantios de eucalipto de diversas empresas, abrangendo uma variabilidade de locais, condições de sítio, genótipos e manejos silviculturais. Toda a população abaixo da FS constitui a população FI que é considerada a população de baixa produtividade.

Para a população FS, verificou-se que, em condições de teores foliares a maior e menor variabilidade, quantificada pelo coeficiente de variação (CV) foi obtida para Mn (CV = 47,10%) e N (CV = 16,10%), respectivamente. O mesmo foi observado para a população FI, em que a maior variabilidade também foi obtida para Mn (92,82%) e a menor para N (20,5%) (Tabela 5). Os resultados obtidos para a população FS foram semelhantes aos encontrados por Galdino (2015), que utilizaram a mesma população FS do presente estudo para gerar normas KW e DRIS.

Comparando as variabilidades dos teores de macro e micronutrientes entre as populações FS e FI verifica-se que para esta última os CV de todos os nutrientes são superiores quando comparados com os CV obtidos para a população FS, ou seja, a população de baixa produtividade possui maior variabilidade dos teores nutricionais, apresentando CV médio de 46% contra um CV médio de 29,8% da população FS. Resultado semelhante foi observado para a variável de crescimento altura, onde a população FI apresentou variabilidade cerca de duas vezes superior a variabilidade desta mesma variável na população FS.

Tabela 5: Estatística descritiva para os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn, B, e para a variável de crescimento altura dos dados que compreenderam as populações de fronteira superior (FS) e inferior (FI)

| Nutriente                 | Média                             | S      | CV    | Mínimo | Máximo  | Média                              | S      | CV    | Mínimo | Máximo  |
|---------------------------|-----------------------------------|--------|-------|--------|---------|------------------------------------|--------|-------|--------|---------|
|                           | -----Alta Produtividade (FS)----- |        |       |        |         | -----Baixa Produtividade (FI)----- |        |       |        |         |
| N (g kg <sup>-1</sup> )   | 20,67                             | 3,33   | 16,10 | 13,30  | 29,75   | 22,10                              | 4,53   | 20,50 | 6,48   | 44,61   |
| P (g kg <sup>-1</sup> )   | 1,22                              | 0,32   | 25,97 | 0,60   | 2,10    | 1,40                               | 0,49   | 34,97 | 0,40   | 3,90    |
| K (g kg <sup>-1</sup> )   | 7,69                              | 1,90   | 24,77 | 4,50   | 12,80   | 9,40                               | 2,84   | 30,20 | 1,86   | 23,00   |
| Ca (g kg <sup>-1</sup> )  | 5,92                              | 1,54   | 26,01 | 2,30   | 9,90    | 5,55                               | 2,07   | 37,30 | 1,30   | 22,40   |
| Mg (g kg <sup>-1</sup> )  | 2,57                              | 0,67   | 25,98 | 1,16   | 4,80    | 2,24                               | 0,65   | 28,99 | 0,20   | 6,40    |
| S (g kg <sup>-1</sup> )   | 1,67                              | 0,43   | 25,81 | 0,78   | 2,90    | 1,67                               | 0,72   | 43,39 | 0,20   | 5,96    |
| Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) | 7,40                              | 2,04   | 27,50 | 3,20   | 12,00   | 5,53                               | 3,32   | 59,99 | 0,10   | 22,00   |
| Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) | 114,61                            | 47,42  | 41,37 | 36,00  | 256,00  | 96,48                              | 69,73  | 72,27 | 7,71   | 985,23  |
| Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) | 14,68                             | 3,99   | 27,16 | 6,75   | 26,00   | 17,30                              | 6,62   | 38,25 | 2,20   | 54,00   |
| Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) | 450,28                            | 212,09 | 47,10 | 60,00  | 1100,00 | 450,33                             | 418,01 | 92,82 | 2,00   | 4457,74 |
| B (mg kg <sup>-1</sup> )  | 42,24                             | 16,65  | 39,42 | 8,43   | 74,40   | 38,51                              | 18,60  | 48,29 | 1,50   | 284,00  |
| Altura (m)                | 20,21                             | 6,26   | 30,96 | 4,48   | 29,59   | 7,29                               | 5,44   | 74,71 | 0,40   | 28,72   |

Sd: desvio padrão, CV: coeficiente de variação, FS: fronteira superior, FI: fronteira inferior, H: altura.

## 4.2. Crescimento das árvores

O crescimento das árvores foi estimado a partir das equações ajustadas para a população FS, ou seja, para a população de maior produtividade. Como os dados da população FS foram os mesmos utilizados por Galdino (2015), no presente estudo, utilizou-se as mesmas equações ajustadas por este autor para as variáveis altura (m), *dap* (cm) e volume (m<sup>3</sup>), todas em função da idade (ano) (Tabela 6).

A partir dessas equações, estimou-se a altura e volume da população de baixa produtividade. Vale salientar que, ao utilizar as equações ajustadas para a população FS (alta produtividade) na população de baixa produtividade (FI) o que é obtido é o crescimento potencial em altura e em volume dessas populações, uma vez que, na de alta produtividade, considera-se que o status nutricional das árvores estão em níveis adequados.

Tabela 6: Equações ajustadas para altura (H), diâmetro a 1,30 m do solo (*dap*) e volume (vol) para os dados selecionados na população de fronteira superior

| Variável              | Equação  | R <sup>2</sup> |
|-----------------------|--|----------------|
| H (m)                 | $\ln(y) = 4,10 - 1,87/x^{0,5}$                   | 0,97           |
| <i>dap</i> (cm)       | $\hat{y} = 6,0343 + 7,0059 \ln(x)$               | 0,89           |
| vol (m <sup>3</sup> ) | $\hat{y} = e^{-2,0584-2,4084/x + 0,7514 \ln(x)}$ | 0,99           |

H = altura (m); *dap* = diâmetro a 1,30 m do solo (m); vol = volume (m<sup>3</sup>); y=variável dependente; x= variável independente (idade (ano)); R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação. (GALDINO, 2015)

### 4.3. Normas CND

As normas CND para plantios comerciais de eucalipto distribuídos em diversas regiões do país foram constituídas pela média e o desvio-padrão de cada variável multinutriente obtidas para a população de alta produtividade (FS) (Tabela 7). Todos os micronutrientes apresentaram valores negativos. Estes, por sua vez, indicam que a concentração foliar de cada um desses elementos na variável multinutriente foi inferior à média geométrica da composição nutricional.

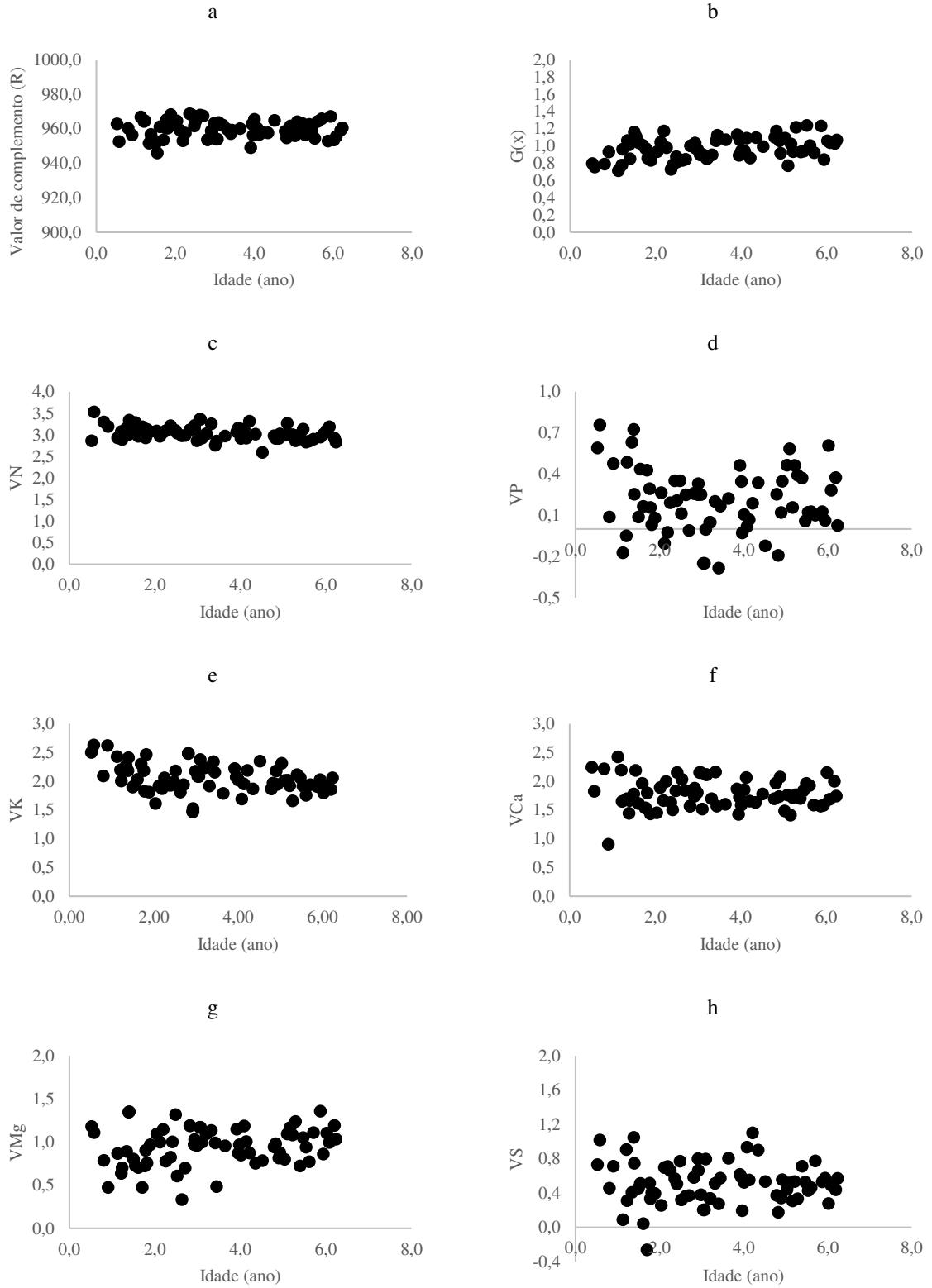
Mesmo que as normas CND sejam estabelecidas apenas pela média e desvio-padrão de cada variável multinutriente, o cálculo do CV também é importante, pois ele quantifica a variabilidade dos resultados e conseqüentemente indica a precisão da norma, onde, maiores valores de CV significam menor precisão e menores valores de CV significam maior precisão. Assim, a seqüência decrescente de precisão para as normas CND, estabelecidas por este estudo, para povoamentos de eucalipto é dada por  $Zn = N = Cu > K > B = Ca > Fe > Mg > S > Mn > P$ , onde a maior variabilidade foi obtida para a norma de P (CV = 109,66%), e as menores obtidas para as normas de Zn, N e Cu (CV  $\cong$  5,00%).

Tabela 7: Normas CND para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B para plantios comerciais de eucalipto no Brasil, com idades variando de 0,4 a 7,0 anos

| Estatística   | G (x)  | VN    | VP      | VK     | VCa    | VMg    | VS     | VCu    | VFe    | VZn    | VMn    | VB     |
|---------------|--------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Média         | 0,971  | 3,053 | 0,205   | 2,047  | 1,782  | 0,948  | 0,517  | -4,911 | -2,213 | -4,220 | -0,890 | -3,223 |
| Desvio Padrão | 0,124  | 0,158 | 0,225   | 0,251  | 0,258  | 0,217  | 0,241  | 0,258  | 0,384  | 0,210  | 0,493  | 0,452  |
| CV (%)        | 12,719 | 5,187 | 109,658 | 12,286 | 14,502 | 22,874 | 46,561 | 5,249  | 17,363 | 4,986  | 55,430 | 14,019 |

CV = coeficiente de variação

Avaliando o padrão de distribuição das variáveis R, G(x) e  $V_i$ , da população de alta produtividade, ou seja, o padrão de distribuição das variáveis geradoras das normas CND em função da idade, verificou-se que para a maioria delas a distribuição é constante não apresentando variabilidade durante todo o período de crescimento (Figura 1), com exceção do fósforo (VP), que apresentou maior dispersão dos dados em decorrência da idade, fato que explica a maior variabilidade da norma deste nutriente. Entretanto, mesmo diante deste resultado em relação a VP, a ausência de variabilidade das normas CND em função da idade de todos os outros nutrientes e também de R e G(x) indica que a população de alta produtividade, determinada pelo método da linha de fronteira, pode ser utilizada para gerar as normas CND.



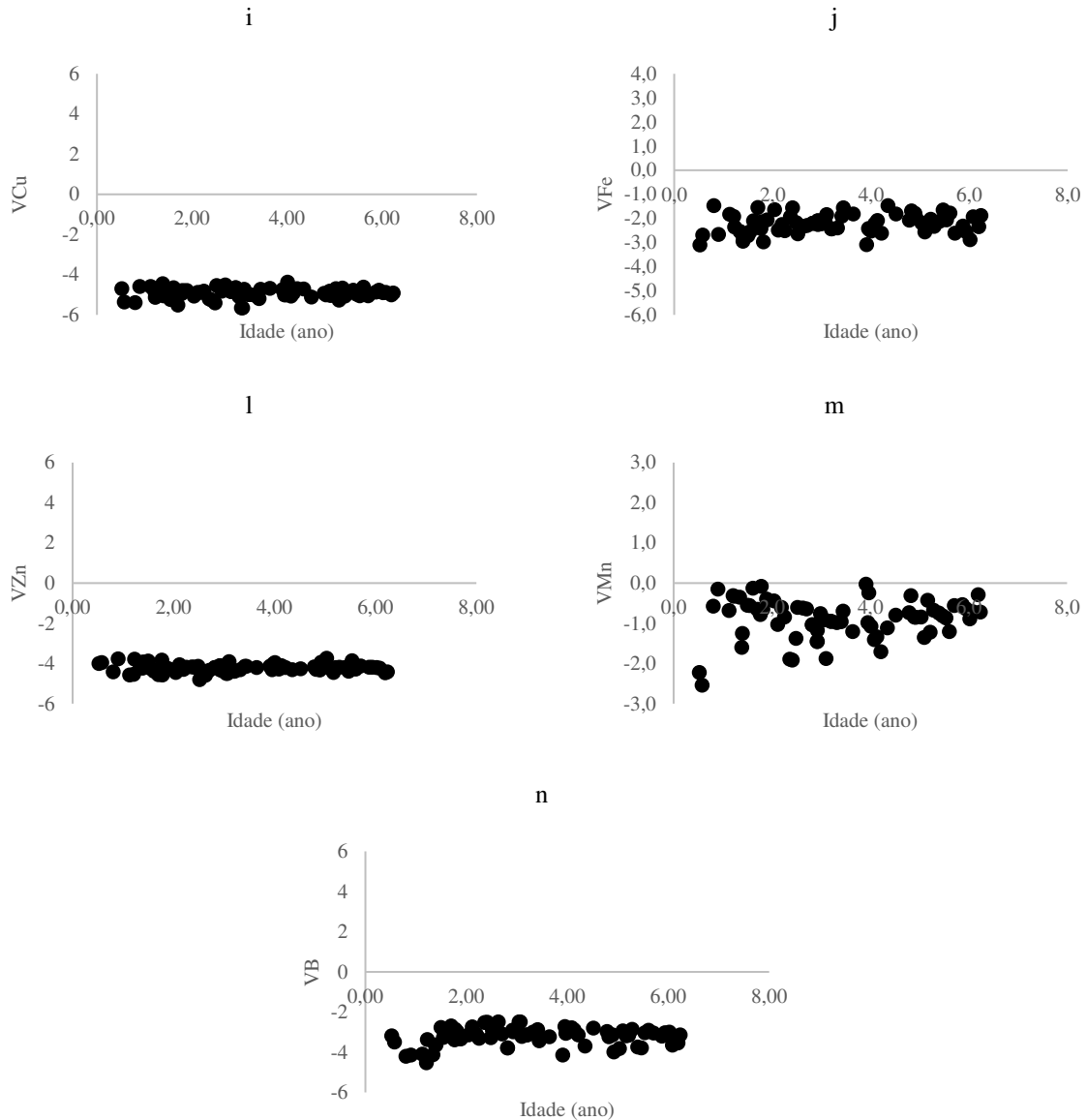


Figura 1: Padrão de distribuição das normas CND em função da idade a) valor de complemento (R), b) média geométrica composicional (G(x)), c) variável multinutriente para N (VN), d) variável multinutriente para P (VP), e) variável multinutriente para K (VK), f) variável multinutriente para Ca (VCa), g) variável multinutriente para Mg (VMg), h) variável multinutriente para S (VS), i) variável multinutriente para Cu (VCu), j) variável multinutriente para Fe (VFe), k) variável multinutriente para Zn (VZn), l) variável multinutriente para Mn (VMn), m) variável multinutriente para B (VB).

Utilizar o CV como medida quantitativa da precisão das normas é uma vantagem, pois, trata-se de uma medida relativa, a qual, possibilita a comparação com as normas obtidas por outros estudos, bem como com variáveis de naturezas diferentes (LOPES et al. 2021). Assim, ao

comparar a variabilidade dos teores nutricionais (considerando os nutrientes isoladamente), da população de referência com a variabilidade das variáveis multinutrientes desta mesma população, verifica-se que, a média do CV envolvendo todos os 11 nutrientes foi ligeiramente menor para as variáveis multinutrientes (CV = 28%) quando comparada com a média do CV dos seus teores (CV= 29,7%) (Tabela 5). Essa pequena diferença é em decorrência da redução dos valores de CV em grande parte dos nutrientes, quando, estes tiveram os seus teores transformados nas variáveis multinutrientes, exceto para P, S e Mn, em que, as variáveis multinutrientes destes nutrientes apresentaram valores de CV cerca de 4 vezes (P) e 2 vezes (S e Mn), superiores aos valores de CV dos seus teores.

Nesse mesmo sentido, ao considerar separadamente macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B), nutrientes móveis (N, P, K e Mg), pouco móveis (S, Cu, Fe, Zn e Mn) e imóveis na planta (Ca e B), a variabilidade sempre foi menor para as variáveis multinutrientes, isto é, para as normas, com exceção dos grupos dos macronutrientes e dos nutrientes móveis. Para o primeiro o valor de CV médio foi de 35,2%, valor superior quando comparado ao CV médio referente aos teores que foi de 24,1% e, já o segundo, apresentou CV médio das variáveis multinutrientes de 37,5% versus 23,2% quando considera-se os seus teores. Essa maior variabilidade apresentada por ambos os grupos pode ser explicada pela alta variabilidade obtida para o P nas normas CND. Este resultado foi diferente ao obtido por Fernandes (2010) que ao estabelecer normas KW e DRIS para plantios jovens de eucalipto cultivados no estado de São Paulo, verificou que a variabilidade (CV) das relações duais (normas DRIS) foi sempre maior que a variabilidade (CV) dos teores (normas KW) na população de referência, independente de considerar todos os nutrientes ou apenas aqueles com alta mobilidade no floema. No trabalho citado, os valores médios dos coeficientes de variação foi 59,8% e 42% para as relações duais e os teores, respectivamente.

A alta variabilidade obtida para as normas de P, Mn e S pode ser em resultado da influência dos nutrientes que apresentam alta variabilidade quanto aos seus teores na população de referência, principalmente para métodos de diagnose nutricional que leva em consideração a interação entre os nutrientes. Em alguns estudos que estabeleceram normas KW e DRIS para plantios de eucalipto, nutrientes com altas variabilidades em seus teores na população de referência influenciaram na variabilidade das normas quanto as relações duais. Galdino (2015) utilizando-se do mesmo banco de dados do presente estudo, ao estabelecer normas KW e DRIS para plantios de eucalipto, verificou que maiores valores de CV foram obtidos nas relações duais entre nutrientes com alto CV quanto às normas de teores, a exemplo de Mn/Fe (CV=68,5%) e Mg/Cu (CV=39,9%), e menores valores de CV, foram obtidos nas relações entre

dois nutrientes que também apresentaram menor valor de CV quanto aos teores, como N/P (CV=26,4%) e N/K (CV= 29,5%). Resultado semelhante foi apresentado por Rocha (2008), que ao realizar o diagnóstico nutricional de plantios jovens de eucalipto cultivados no litoral do Espírito Santo e Sul da Bahia, verificou que a variabilidade das normas DRIS eram sempre superiores nas relações entre dois nutrientes com alta variabilidade quanto aos seus teores, como para Cu/Mn (CV=83,1%), Fe/Cu (CV=111,3%) e B/Mn (CV = 82,0%).

Como o CND é um método de diagnose nutricional que considera a relação entre todos os nutrientes e um valor de complemento, ou seja, considera a composição total do tecido, o efeito da variabilidade de um único elemento no resto dos nutrientes é considerado como um efeito global e não como a contribuição de vários efeitos individuais em cada um dos demais nutrientes como observado para o DRIS (FERRÁNDEZ-CÁMERA et al. 2020). Segundo estes autores, esta é uma vantagem do CND em relação ao DRIS, uma vez que, o primeiro pode gerar normas com menor variabilidade e consequentemente resultar em diagnósticos nutricionais mais precisos. No entanto, mesmo diante desta vantagem, normas CND com alta variabilidade ainda são observadas em alguns nutrientes, como demonstrado neste trabalho para P, S e Mn.

Poucos são os estudos que utilizaram o CND na diagnose nutricional do eucalipto. O primeiro deles foi realizado por Silva (2001) que estabeleceu normas CND para plantios de *Eucalyptus grandis*, com idades entre 72 e 152 meses, cultivados na região Centro Leste de Minas Gerais, para os macronutrientes N, P, K, Ca e Mg. No estudo citado, a maior e menor variabilidade, das normas universais, foi obtida para K (CV =128%) e P (CV = 6,80%), respectivamente. Outro estudo, foi realizado em mudas clonais de *Eucalyptus spp*, em que as normas CND para N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B foram estabelecidas para a matéria seca (MS) e o índice de qualidade de dickson das mudas (IQD). Ambas as variáveis, apresentaram maiores variabilidades para P e S, com valores de CV de 166,7% (P) e 1633% (S) para a MS e 227,8% (P) e 383,3% (S) para o IQD (MORAIS et al., 2019). Rocha (2020) estabeleceu normas CND para plantios de eucalipto na Amazônia Oriental, aos 24 meses de idade, para os macronutrientes N, P, K, Ca e Mg. O autor verificou maior variabilidade das normas para K (CV=50%). Altas variabilidades das normas CND também foram observadas em culturas como o milho, com maior variabilidade apresentada pelo Zn (CV = 1203,4%) (EL KADRI, 2017), para o feijoeiro, com maior variabilidade do S (CV = 61,90%) (PARTELLI et al., 2014), e para o caueiro, que assim como o presente estudo, apresentou maior variabilidade nas normas CND de P (CV= 57,6%), S (CV= 68,3%) e Mn (CV = 52,3%) (BAHIA, 2021).

Altas variabilidades nas normas de alguns nutrientes são observadas quando se utiliza de uma base de dados provenientes de lavouras comerciais (BAHIA, 2021). Segundo este autor,

estes tipos de dados, retratam melhor as condições de campo, porém, implica na influência de fatores não controlados e diferentes do fator de estudo, mesmo considerando as lavouras de alta produtividade. O autor também enfatiza a influência de atributos físicos, químicos e físico-químico do solo na variabilidade das normas, quando se utiliza de dados com plantios distribuídos em diferentes tipos de solo e em diferentes condições climáticas e, destaca a necessidade de buscar formas de reduzir a influência desses fatores não nutricionais, como o uso do método da linha de fronteira.

A aplicação do conceito da linha de fronteira é indicada para pesquisas com uma ampla base de dados de lavouras comerciais (MENDONÇA, 2016; ALI, 2018), pois ele isola o efeito de um dado fator de produção, sobre a variável dependente, estratificando a população em alta e baixa produtividade. Nesse sentido, como o presente estudo compreende uma ampla base de dados de lavouras comerciais, o método da linha de fronteira foi utilizado para obter a população de alta produtividade e a partir desta gerar as normas CND. O uso de populações de alta produtividade para obtenção das normas ou valores de referência é o recomendado, pois, considera-se que nestas populações a nutrição e os outros fatores de produção encontram-se em valores ótimos (WADT, 1996). Além disso, nestas populações os teores nutricionais possuem menor variabilidade quando comparados com os teores nutricionais de toda a população ou a população de média/baixa produtividade, os quais, apresentam menores valores de CV (Tabela 5), proporcionando maior sensibilidade no diagnóstico (FERNANDES, 2010).

Os resultados obtidos neste estudo, confirmam ambas as teorias, em que, a metodologia da linha de fronteira selecionou a população mais produtiva, que apresentou, na maioria das vezes, teores nutricionais com baixos valores de CV, quando comparados com os valores de CV da população de baixa produtividade (Tabela 5) e quando esses teores foram transformados em variáveis multinutrientes (normas CND), essa variabilidade foi ainda menor, com exceção do P, S e Mn, como dito anteriormente. Isso indica que, as maiores variabilidades nas normas destes nutrientes provavelmente não estão relacionadas as suas variabilidades em decorrência dos diferentes tipos de solo e condições climáticas, mas sim em razão da interação entre os nutrientes na planta e a influência de nutrientes com maior variabilidade quanto aos seus teores, como exemplo, a influência daqueles nutrientes que apresentaram maiores valores de CV quanto aos seus teores como Fe, Mn e B (Tabela 5). Em estudo semelhante a este, com a mesma base de dados, porém, com diagnóstico nutricional realizado pelo KW e DRIS, observou-se altas variabilidades nas normas DRIS nas relações duais envolvendo o P, principalmente, quando este foi relacionado com Fe, Mn e B, nutrientes com maiores valores de CV quanto aos teores (mesmo valores do presente estudo). Nestas relações os CV obtidos foram de 57,36%

para P/Fe, 100,0% para P/Mn e 63,91% para P/B (GALDINO, 2015). Fernandes (2010) também verificou menor precisão quanto aos teores de Fe e Mn ao avaliar o grau de balanço nutricional e propôs a exclusão de ambos os nutrientes na diagnose quanto ao grau de equilíbrio, o que resultou em um aumento na sensibilidade deste último.

O P é um dos nutrientes requeridos em menores quantidades pelas plantas. Entretanto, devido a sua pouca disponibilidade em solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos brasileiros, principalmente os das regiões de cerrado, o manejo inadequado deste nutriente no solo pode limitar a produtividade das culturas, sendo necessário a obtenção de normas com maior precisão que resultará em diagnósticos nutricionais mais assertivos. Sabe-se que grande parte dos plantios com eucalipto no Brasil são predominante nessas regiões e a disponibilidade deste nutriente e conseqüentemente a sua absorção pelas árvores é influenciada por fatores relacionados ao solo (tipo, teor de argila, capacidade tampão) (NOVAIS et al., 2007; VINHA et al., 2021), ao genótipo (eficiência de absorção, profundidade, morfologia e arquitetura das raízes) (NETO et al., 1996; BARROS et al., 2005; STAHL et al., 2013), a idade da floresta (MASSAD, 2020), ao clima (TOMÉ JÚNIOR, 2004) e ao modo de aplicação do fertilizante (LEITE et al., 2009).

Como este trabalho engloba um banco de dados com toda essa diversidade de fatores, esperava-se que o uso da metodologia de linha de fronteira para obter populações de alta produtividade, isolasse o efeito dos mesmos, como mencionado anteriormente. Isso foi verificado, uma vez que, a precisão dos teores da maioria dos nutrientes foi satisfatória, inclusive a do P, e a dispersão das normas CND em função da idade foi constante (Figura 1). Assim, esta metodologia mostrou-se adequada de ser utilizada para determinar a população de referência. Entretanto, nutrientes que apresentam variabilidades quanto aos seus teores acima de 30% podem influenciar de maneira significativa a variabilidade das normas CND, mesmo que neste método o efeito da variabilidade de um ou mais nutrientes seja um efeito global. Diante disso, destaca-se a necessidade de mais estudos que comparem metodologias para o estabelecimento da população geradora das normas CND e também que avaliam a influência da variabilidade dos teores dos nutrientes desta população na precisão das normas CND.

#### **4.4. Diagnose nutricional e Potencial de resposta à adubação**

A diagnose nutricional foi realizada na população de baixa produtividade em um total de 9458 registros. Nesta, obteve-se os índices CND para cada macro e micronutriente, os quais,

apresentaram valores negativos, próximos de zero e positivos. No entanto, a correta diagnose nutricional desses povoamentos de eucalipto, não se dá somente pelo cálculo dos índices CND para cada nutriente, mas sim pela correta interpretação de cada um deles.

Nutrientes com índices CND negativos são diagnosticados como deficientes, isto é, a sua concentração relativa na população sob diagnose é menor que a concentração relativa destes na população de referência. Por outro lado, nutrientes com índices CND positivos, são considerados como excesso, uma vez que, sua concentração relativa é superior a norma. Por fim, nutrientes com índices CND nulos são considerados equilibrados. Diante desses valores dos índices CND, os nutrientes foram ordenados quanto ao seu grau de limitação nutricional, desde o mais deficiente (índices negativos) ao mais excessivo (índices positivos).

Entretanto, essa forma de interpretação dá uma visibilidade apenas qualitativa do desequilíbrio nutricional, sendo necessário também a identificação da intensidade que cada nutriente está contribuindo para este desequilíbrio. Esta intensidade é dada pela magnitude do afastamento do índice em relação ao valor ideal, que para o CND é zero (SILVA, 2001). Além disso, segundo este autor, a diagnose nutricional considerando apenas a sequência de limitação e a magnitude dos índices, não permite identificar claramente os nutrientes realmente limitantes, seja por falta ou excesso e sugeriu o uso do  $IEN_m$  e o PRA para separar os nutrientes limitantes dos não limitantes. Assim, posteriormente ao cálculo dos índices CND foi obtido o  $IEN_m$  para cada talhão sob diagnose. Este, por sua vez, mede o grau de desequilíbrio nutricional do talhão avaliado, e pode ser utilizado para compará-los, em que, talhões com maior valor do  $IEN_m$  apresentam maior desequilíbrio nutricional e talhões em que o valor de  $IEN_m$  for menor ou próximo de zero, estão equilibrados nutricionalmente. Os valores de  $IEN_m$  obtidos variaram de 0,23 a 3,75 com média igual a 1,32.

Como a base de dados do presente estudo é bem ampla, mais de 9000 talhões em diagnose, uma alternativa para verificar o equilíbrio nutricional desta população foi estratificar os valores de  $IEN_m$  em classes com amplitude de 0,5 e avaliar a frequência relativa dos talhões para cada classe: classe 1 (0 – 0,5); classe 2 (0,51 a 1,0), classe 3 (1,01 – 1,5), classe 4 (1,51 – 2,0), classe 5 (2,01 – 2,5), classe 6 (2,51-3,0), classe 7 (3,01 – 3,5), classe 8 (> 3,51). Baixas frequências relativas foram obtidas para a classe 1 (1,64%) e para as classes 6 (1,34%), 7 (0,73%) e 8 (0,18%), ou seja, para os status mais equilibrado e mais desequilibrado nutricionalmente. Maiores frequências foram obtidas para a classe 3, seguida da classe 2, 4 e 5 com 37,95%, 28,75%, 22,18%, 7,23%, respectivamente. Essa verificação indicou que, cerca de 60% dos povoamentos de eucalipto em estudo, encontra-se com o  $IEN_m$  entre 1,0 a 2,0, ou seja, valores

estes que, ao comparar a população como um todo, estão mais distantes de zero e consequentemente são talhões diagnosticados como desequilibrados nutricionalmente.

A média dos IEN<sub>m</sub> obtidos neste estudo, 1,32, foi superior à média dos IEN<sub>m</sub> de outros estudos que avaliaram o status nutricional de povoamentos de eucalipto pelo CND, as quais foram iguais a 0,86 (SILVA, 2001) e 1,01 (ROCHA, 2020). Vale salientar que, os trabalhos citados, compreendiam uma menor base de dados quando comparado com o presente estudo e avaliaram apenas macronutrientes como N, P, K, Ca e Mg. A maior proporção de talhões que provavelmente são considerados como desequilibrados nutricionalmente, neste estudo, está relacionada aos teores inadequados de um ou mais nutrientes, seja por falta ou excesso, que resulta nesse desequilíbrio nutricional e a identificação destes foi obtida pelo PRA.

O IEN<sub>m</sub> também foi utilizado como valor de referência para o estabelecimento das classes do PRA (WADT, 1996, SILVA et al., 2004, ROCHA, 2020), onde considerou-se a frequência relativa de cada nutriente para cada uma das classes avaliadas (Tabela 8). Verifica-se que para a classe p a maior frequência foi observada para o Cu, em que, 34% dos talhões apresentaram resposta positiva à adubação para este nutriente. Por outro lado, a menor frequência foi observada para o P, em que, apenas 2% dos talhões respondem positivamente à adubação.

Para a classe pz a maior frequência foi dada pelo Fe (16%) e a menor pelo K (5%). Já na classe z, observou-se maior e menor frequência relativa dos talhões para o B (77%) e Cu (43%), respectivamente. Na classe nz a maior frequência relativa foi obtida pelo K (29%) e a menor pelos nutrientes Mg, Fe e B, todos eles com a frequência de 5%. Por fim, para a classe n, a maior frequência relativa foi para o Fe (21%) e a menor para o Cu (3%), o que já era esperado, uma vez que, o Cu foi o nutriente em que se observou a maior frequência de talhões respondendo positivamente a adubação com este nutriente.

Tabela 8: Frequência relativa dos talhões de baixa produtividade para as classes de potencial de resposta à adubação para N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe e Zn

| Classe de PRA | N         | P  | K  | Ca | Mg | S  | Cu | Fe | Zn | Mn | B  |
|---------------|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|               | -----(%)- |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| p             | 4         | 2  | 3  | 6  | 13 | 12 | 34 | 8  | 5  | 9  | 5  |
| pz            | 7         | 6  | 5  | 11 | 12 | 13 | 13 | 16 | 8  | 15 | 8  |
| z             | 49        | 57 | 50 | 67 | 68 | 50 | 43 | 64 | 44 | 56 | 77 |
| nz            | 26        | 25 | 29 | 9  | 5  | 19 | 7  | 5  | 22 | 9  | 5  |
| n             | 13        | 10 | 13 | 7  | 2  | 6  | 3  | 8  | 21 | 12 | 4  |

PRA = potencial de resposta à adubação, p = positiva, pz = positiva ou nula, z = nula, nz = negativa ou nula, n = negativa.

Maior síntese do diagnóstico é dada pelo agrupamento das classes. Assim, as duas primeiras (p e pz) e as duas últimas (nz e n) classes de *status* nutricional foram agrupadas e os talhões classificados de acordo com a frequência relativa dos mesmos em três novas classes, sendo elas: resposta positiva à adubação para os nutrientes limitantes por falta (LF), resposta negativa à adubação, para os nutrientes limitantes por excesso (LE) e resposta nula, para os nutrientes não-limitantes (NL) (Tabela 9).

De acordo com estes resultados, verifica-se que o Cu continuou sendo o nutriente mais limitante por falta, onde 47% dos talhões responderiam positivamente à adubação com este micronutriente. Já os nutrientes mais limitantes por excesso foram o Zn (44%), seguido do K, N e P em que, 42%, 39% e 35% dos talhões, respectivamente, apresentaram resposta negativa à adubação. Em contrapartida, para a classe de resposta nula, o nutriente que se mostrou não-limitante na maioria dos talhões avaliados foi o B, pois, para este nutriente, 77% dos talhões avaliados apresentaram resposta nula à adubação. Diante disso, considerando a classe p, a ordem decrescente de limitação dos nutrientes por falta é dada por  $Cu > Mg = S > Fe = Mn > Ca > Zn = B > N > P = K$ .

Tabela 9: Frequência relativa dos talhões de baixa produtividade nas classes de potencial de resposta à adubação positiva, nula e negativa para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B

| Classes de PRA | N              | P  | K  | Ca | Mg | S  | Cu | Fe | Zn | Mn | B  |
|----------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                | ------(%)----- |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| positiva       | 12             | 8  | 8  | 16 | 25 | 25 | 47 | 24 | 13 | 24 | 13 |
| nula           | 49             | 57 | 50 | 67 | 68 | 50 | 43 | 64 | 44 | 56 | 77 |
| negativa       | 39             | 35 | 42 | 16 | 7  | 25 | 10 | 13 | 44 | 20 | 9  |

PRA=potencial de resposta a adubação

Desequilíbrios nutricionais provocados por micronutrientes estão associados a falta de informações precisas do manejo desse grupo de elementos nas fertilizações florestais. Grande parte dos trabalhos que avaliam o status nutricional e consequentemente a demanda de nutrientes em plantios de eucalipto restringe-se a informações de macronutrientes como N, P, K, Ca e Mg, e as vezes S (WADT et al., 1998b; SILVA et al., 2004, 2005, ROCHA, 2020). Além disso, o uso de micronutrientes em plantios de eucalipto no Brasil é considerado incipiente, a experiência na fertilização com os mesmos ainda é pequena (BARROS et al., 2014, DUTRA 2020) e poucos são os trabalhos que consideraram os micronutrientes na diagnose nutricional do eucalipto (WADT, 2004; CAMPION e SCHOLLES, 2007; MORAIS et al., 2019).

Maior atenção na suplementação de micronutrientes em programas de fertilização mineral em plantios de eucalipto no Brasil, foi dada em anos mais recentes (nas últimas duas décadas), em razão da consolidação da silvicultura clonal no país, em que, clones mais produtivos, são preferencialmente utilizados e, estes, são mais exigentes nutricionalmente (DUTRA, 2020). Além dessa fertilização com micronutrientes ser considerada recente e da falta de informação sobre o manejo destes, outras dificuldades são enfrentadas para o melhor aprimoramento nas fertilizações com esses elementos, como a diferença de exigência entre os clones, a falta de critérios específicos para a interpretação de análise de solo e as variações nas condições climáticas entre as regiões de plantio (BARROS et al., 2014).

O presente estudo engloba uma diversidade de clones, regiões, tipos de solos e idades dos plantios. Todos estes fatores também interferem na disponibilidade dos nutrientes nos solos e sua consequente absorção e alocação na biomassa das plantas, sejam para os macronutrientes ou micronutrientes. Ademais, esses plantios pertencem a uma diversidade de empresas que podem ou não adotar um manejo de fertilização padrão. Considerando que informações nutricionais quanto a demanda por micronutrientes da cultura são incipientes, a padronização da fertilização com esses elementos provavelmente é adotada, onde a metodologia utilizada por uma grande empresa de respeito em uma determinada região é replicada por vários outros produtores (DUTRA, 2020), sem, contudo, atentar-se a exigência do clone e a disponibilidade desses elementos de acordo com as características de solo e clima de regiões diferentes da referida empresa.

Alguns trabalhos tem relatado sintomas de deficiência de micronutrientes em plantios de eucalipto, em regiões de Cerrado, principalmente para B, Cu e Zn (ROCHA, 2008; RODRIGUES et al., 2012). Resultados que corroboram, em parte, com o presente estudo que verificou maior frequência de talhões com deficiência de Cu. O Cu participa de uma ampla variedade de processos fisiológicos da planta, pois, atua como cofator de várias enzimas, participa da atividade fotossintética, desempenha papel indireto na produção de clorofila, exerce a função principal em estádios reprodutivos, entre outras (DECHEN et al., 2018) e sua deficiência pode causar diversos distúrbios no metabolismo vegetal. Em plantios de eucalipto, a deficiência desse nutriente merece atenção, principalmente naqueles destinados à produção de produtos sólidos de madeira, uma vez que, a falta de Cu, causa defeitos na madeira como a perda da flexibilidade da madeira, deformação do tronco e acúmulo de fenóis. Estes defeitos também podem ser observados em plantios sob deficiência de B (BARROS et al., 2014).

Por outro lado, ao contrário do que ocorreu para o Cu, o Zn foi o micronutriente com maior número de talhões classificados como resposta negativa a adubação, sugerindo o desequilíbrio

nutricional deste nutriente por excesso. O Zn atua como cofator enzimático, é essencial para a atividade, regulação e estabilização da estrutura proteica, constituinte de enzimas desidrogenases, participa da ativação enzimática da trifosfato desidrogenase e afeta a síntese e conservação de auxinas (DECHEN et al., 2018). Diante disso, a suplementação mineral com este nutriente tem sido contemplada nos programas de fertilizações, uma vez que, trata-se de um elemento essencial para as plantas. Entretanto, a falta de uma precisão quanto ao manejo deste nutriente, pode resultar na aplicação de doses muito superiores às necessárias. Doses muito elevadas de um determinado nutriente podem limitar a produtividade da cultura devido a toxicidade. Além disso, o excesso de um determinado nutriente pode resultar em interações antagônicas, como já relatado para Zn e P (BUCHER et al. 2018). Segundo DECHEN et al. (2018) não é normal a ocorrência de toxicidade por Zn, principalmente em plantas cultivadas em solos com valor de pH elevado, porém, essa toxicidade pode ser verificada em solos ácidos ou em solos cujo material de origem são rochas ricas nesse nutriente.

Desequilíbrios nutricionais por excesso observados em alguns talhões para N, P e K podem ser resultado da aplicação de maiores doses desses macronutrientes, também em razão do avanço da silvicultura clonal nas últimas décadas, sendo utilizados, preferencialmente, clones mais produtivos e conseqüentemente mais exigentes nutricionalmente. Além disso, a falta de uma silvicultura de precisão para o manejo nutricional que considera as diferenças nas demandas nutricionais entre os clones utilizados e de acordo com as peculiaridades de determinada região como tipo de solo e condições climáticas (DUTRA, 2020), também pode estar influenciando na adoção de doses de fertilizantes aquém ou além das ótimas em alguns dos programas de fertilização florestal.

Fertilizações com N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil são frequentemente realizadas desde a década de 60, quando teve um avanço das áreas plantadas com essa cultura no país, até os dias atuais, com expressivo aumento nas doses desses nutrientes a partir dos anos 2000 (DUTRA, 2020). Além dos fatores já mencionados, maiores doses desses nutrientes também estão relacionadas com a dinâmica desses elementos no solo e alta demanda dos mesmos nos primeiros anos de desenvolvimento da floresta. O N, está entre os nutrientes requerido em maiores quantidades pelo eucalipto e sua disponibilidade no solo depende dos níveis de matéria orgânica no mesmo, que em algumas áreas de maior predomínio dos plantios com eucalipto, como regiões de Cerrado, os níveis de matéria orgânica no solo são baixos. Já o P não é requerido em grande quantidade pela cultura. Porém, é o nutriente que mais limita o crescimento do eucalipto, devido a sua baixa disponibilidade em solos brasileiros e a alta adsorção deste nutriente nas partículas sólidas do solo. Isso faz com que boa parte do P fique

indisponível para as plantas e a aplicação de elevadas doses deste nutriente se tornam necessárias. Depois do P, o nutriente que mais limita o alcance de altas produtividades dos povoamentos de eucalipto é o K, que em solos de Cerrado este nutriente também pode ser pouco disponível, e juntamente com o N são facilmente perdidos por lixiviação e, por isso, maior atenção é dada a esses nutrientes nos programas de fertilização florestal.

Adubações com doses excessivas de nutrientes, mesmo aqueles requeridos em maiores quantidades pelas culturas ou que se encontram pouco disponíveis no solo devem ser repensadas. O eucalipto é uma cultura com crescimento de médio a longo prazo e vários fatores interferem na sua resposta à adubação como demanda do genótipo, preparo do solo, época de aplicação dos fertilizantes (estação seca ou úmida), estágio de desenvolvimento da floresta, entre outros (SANTANA et al., 2014). Ganhos em produtividade em resposta a maiores doses de nutrientes em florestas de eucalipto, podem ser expressivos nos anos iniciais de desenvolvimento da floresta que antecedem o tocar de copas. Já nos anos após o fechamento do dossel os ganhos em produtividade podem ser mínimos (SILVA et al., 2019). O aumento das doses nutricionais sempre resulta em ganhos de produtividade, exceto quando as doses são tão elevadas que podem causar desequilíbrios por excesso do nutriente e/ou por deficiência de outro nutriente, devido a interação entre eles. Porém, muitas vezes este ganho em produtividade não cobre o alto investimento em fertilizantes e podem comprometer a sustentabilidade produtiva do empreendimento florestal.

Considerando a classe de resposta nula, onde os talhões são diagnosticados como equilibrados nutricionalmente, para uma ampla base de dados como a deste estudo, que engloba plantios de eucalipto compreendidos em várias regiões do país e com diferentes tipos de clones, frequências maiores que 60% foram observadas apenas para os nutrientes Ca, Mg, Fe e B. Este resultado indica que, mesmo diante do avanço tecnológico e de estudos na área da silvicultura, em particularmente, sobre a nutrição florestal, os programas de fertilizações utilizados ainda apresentam lacunas a serem preenchidas, de forma a buscar cada vez mais uma silvicultura de precisão.

Com o teste de qui-quadrado foi possível observar que a frequência com que os nutrientes ocorreram como os mais limitantes no eucalipto não se deveu ao acaso (Tabela 10). Assim, rejeitou-se a hipótese de que os nutrientes ocorreram como limitantes devido ao acaso e aceita a de que o método CND foi eficiente para diagnosticar diferenças de probabilidade de resposta positiva à adubação. Este resultado concorda com os observados por WADT et al. (1998b) e Silva (2001), para o eucalipto, Urano et al. (2006) para a soja, com Serra et al. (2010a) para o algodoeiro e Bahia (2021) para o caucaueiro.

Tabela 10: Teste de qui-quadrado para as frequências observadas (%) de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B como nutriente primário por deficiência <sup>(1)</sup>

| Nutriente    | FO (%) | FE (%) | (FO - FE) <sup>2</sup> /FE |
|--------------|--------|--------|----------------------------|
| N            | 4,32   | 9,09   | 2,50                       |
| P            | 1,81   | 9,09   | 5,83                       |
| K            | 2,79   | 9,09   | 4,37                       |
| Ca           | 5,61   | 9,09   | 1,33                       |
| Mg           | 12,72  | 9,09   | 1,45                       |
| S            | 11,67  | 9,09   | 0,73                       |
| Cu           | 33,99  | 9,09   | 68,21                      |
| Fe           | 7,96   | 9,09   | 0,14                       |
| Zn           | 4,88   | 9,09   | 1,95                       |
| Mn           | 8,72   | 9,09   | 0,01                       |
| B            | 5,33   | 9,09   | 1,56                       |
| Qui-quadrado |        |        | 88,077**                   |

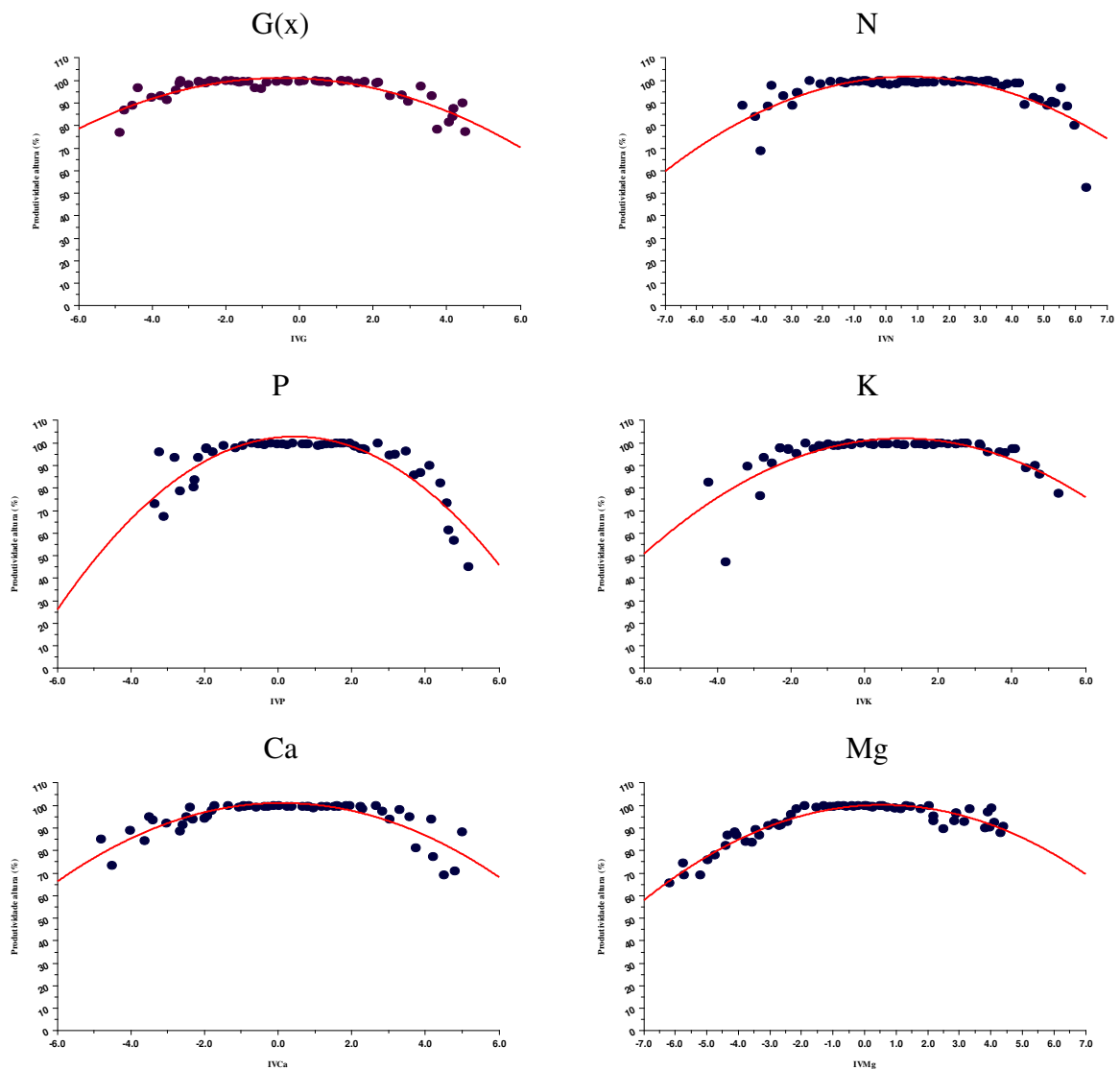
<sup>(1)</sup> Com potencial de resposta à adubação positiva; FO: Frequência observada; FE: Frequência esperada; \*\* significativo a 1% ( $p < 0,01$ ).

A validação da diagnose realizada pelo CND é uma forma de comprovar a assertividade dos resultados obtidos. Geralmente, quando se realiza a diagnose nutricional com dados de plantios comerciais a validação dos resultados é realizada por meio de experimentos de fertilização, onde os teores nutricionais ótimos obtidos pela diagnose são testados em condições controladas. No entanto, de acordo com Silva (2001) este tipo de validação para a cultura do eucalipto é mais complicado, visto o longo tempo necessário para a obtenção dos resultados. Assim, o teste de qui-quadrado é uma alternativa de validação, pois, ele constata se as frequências de ocorrência dos nutrientes como os mais limitantes por falta (resposta p) são devidas ao acaso ou não (WADT et al., 1998b). Segundo este autor, quando as frequências dos nutrientes diagnosticados na referida classe não forem atribuídas ao acaso as normas geradas podem ser utilizadas para a diagnose nutricional.

#### 4.5. Curvas de resposta potencial nutrientes específicas

As CRPNE foram ajustadas considerando o CRH e o CRV em função dos índices CND para todos os nutrientes em diagnose e também para  $G(x)$ . O CRH, foi dado pela relação entre altura observada, medida em campo, e altura estimada, obtida pela equação ajustada para a população FS (Tabela 6). Como a FS compreende os dados de maior produtividade, ao aplicar a referida equação para estimar a altura para a população de baixa produtividade, o resultado é a estimativa do crescimento potencial em altura. Diante disso, valores de CRH igual a 100% indica que a altura observada é igual a altura potencial estimada.

O relacionamento observado entre o CRH e os índices CND considerando todos os nutrientes e também  $G(x)$  foi curvilíneo (Figura 2) e o primeiro modelo ajustado foi modelo polinomial de 2º grau (Tabela 11). As equações se mostraram com boa capacidade explicativa com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) variando de 56% (B) a 91% (Mg) e com todos os parâmetros dos modelos significativos a 1% ( $p < 0,01$ ), exceto para o  $\beta_1$  das equações ajustadas para Ca e Fe. Nota-se que as curvas variaram com o nutriente, indicando que o eucalipto responde distintamente à essas variações.



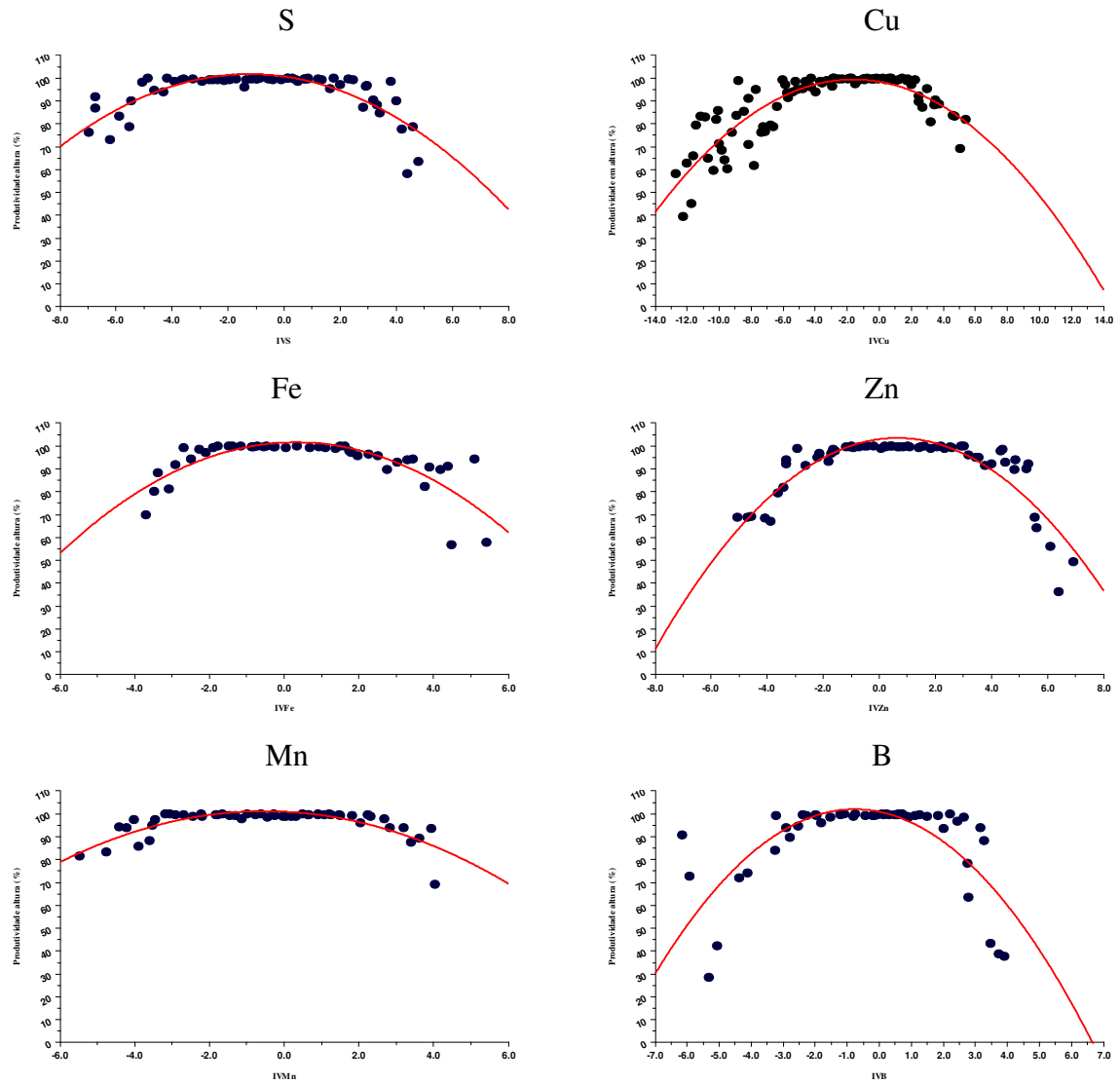


Figura 2: Curvas de respostas potencial nutrientes específicas do crescimento relativo em altura (%) do eucalipto em função dos índices CND para Média geométrica composicional (G(x)), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Boro (B).

Tabela 11: Equações ajustadas, pelo modelo polinomial de 2° grau, para a região de fronteira superior obtida do relacionamento entre o crescimento relativo em altura e os índices CND para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B

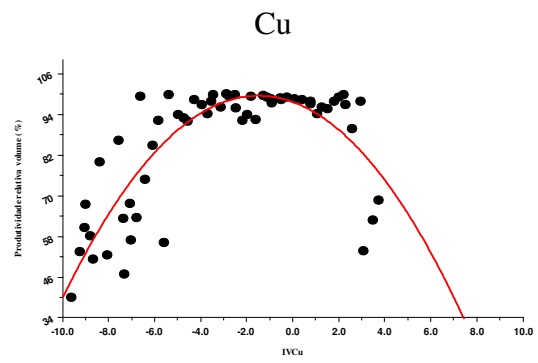
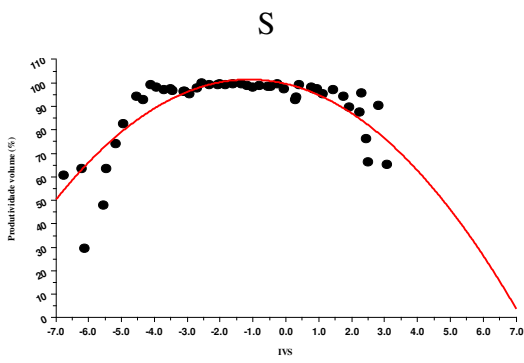
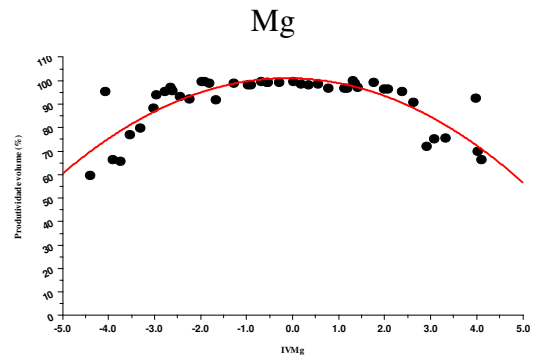
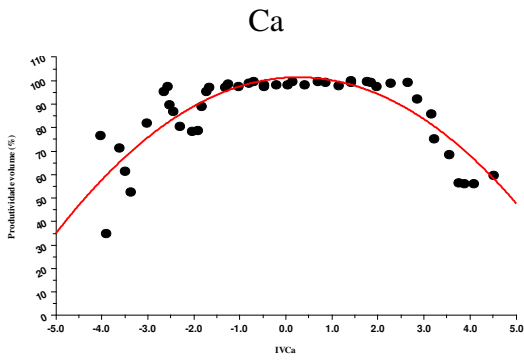
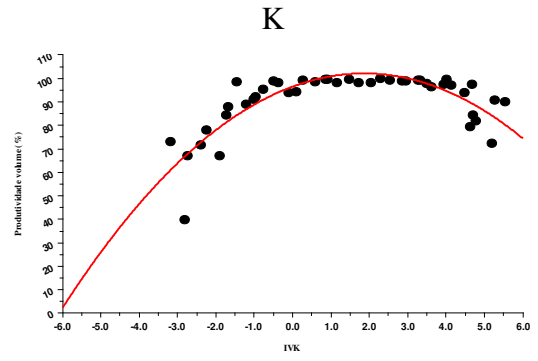
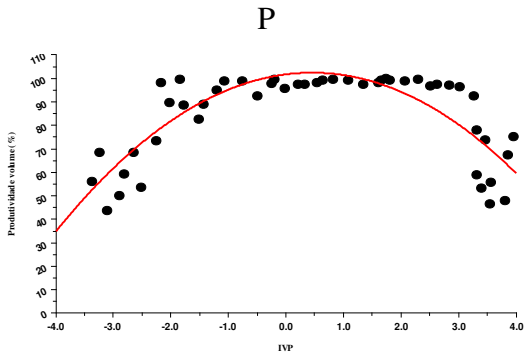
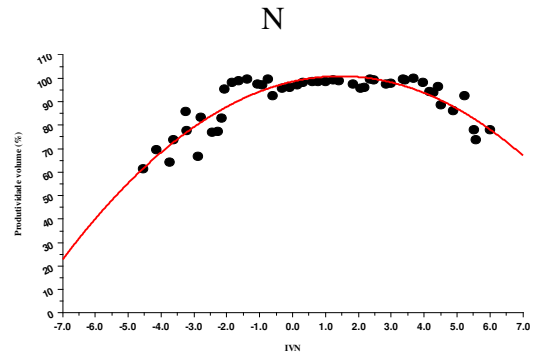
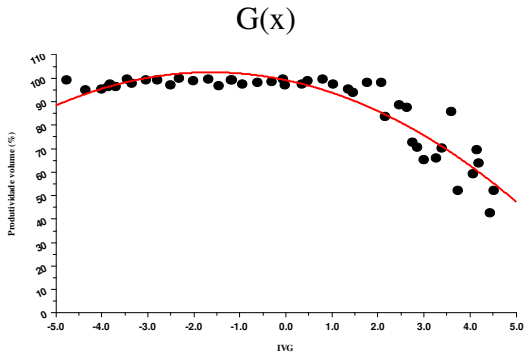
| Nutriente | Parâmetros do modelo |                     |           | Intervalo             | R <sup>2</sup> | Significância dos parâmetros |    |
|-----------|----------------------|---------------------|-----------|-----------------------|----------------|------------------------------|----|
|           | $\beta_0$            | $\beta_1$           | $\beta_2$ |                       |                | parâmetros                   | n  |
| G (x)     | 100,890              | -0,699              | -0,737    | - 4,88 ≤ IVG ≤ 4,52   | 0,75           | p < 0,01                     | 55 |
| N         | 101,240              | 1,035               | -0,701    | - 4,53 ≤ IVN ≤ 6,37   | 0,59           | p < 0,01                     | 64 |
| P         | 102,432              | 1,647               | -1,848    | - 3,36 ≤ IVP ≤ 5,17   | 0,76           | p < 0,01                     | 52 |
| K         | 100,915              | 2,102               | -1,047    | - 4,25 ≤ IVK ≤ 5,26   | 0,60           | p < 0,01                     | 57 |
| Ca        | 101,028              | 0,157 <sup>ns</sup> | -0,740    | - 4,80 ≤ IVCa ≤ 5,01  | 0,70           | p < 0,01                     | 52 |
| Mg        | 99,962               | 0,824               | -0,740    | - 6,18 ≤ IVMg ≤ 4,40  | 0,91           | p < 0,01                     | 62 |
| S         | 100,602              | -1,720              | -0,693    | - 6,98 ≤ IVS ≤ 4,79   | 0,66           | p < 0,01                     | 62 |
| Cu        | 98,326               | -1,222              | -0,378    | - 13,23 ≤ IVCu ≤ 5,40 | 0,73           | p < 0,01                     | 91 |
| Fe        | 101,421              | 0,746 <sup>ns</sup> | -1,217    | - 3,71 ≤ IVFe ≤ 5,41  | 0,62           | p < 0,01                     | 46 |
| Zn        | 102,907              | 1,579               | -1,234    | - 5,07 ≤ IVZn ≤ 6,94  | 0,79           | p < 0,01                     | 64 |
| Mn        | 100,877              | -0,790              | -0,743    | - 5,46 ≤ IVMn ≤ 4,03  | 0,64           | p < 0,01                     | 53 |
| B         | 100,822              | -2,866              | -1,85     | - 6, 16 ≤ IVB ≤ 3,92  | 0,56           | p < 0,01                     | 53 |

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação, n: número de observações obtidos na região de fronteira superior.

Avaliando as curvas ajustadas para a região FS do relacionamento do CRH e dos índices CND, observa-se que o eucalipto tende a apresentar respostas simétricas quanto ao grau de equilíbrio de todos os nutrientes. Entretanto, mesmo com a existência dessa simetria, verifica-se que a falta de alguns nutrientes, como K, Mg e Cu é mais importante que seu excesso. Resultados contrários foram verificados para P e Zn, onde o excesso desses nutrientes tendem a limitar mais a produtividade que a falta deles. Já para G(x) a curva se mostra bem simétrica com maiores produtividades observadas, aproximadamente, entre os intervalos de IV<sub>G</sub> de -2,5 a 2,5.

O ajuste das CRPNE considerando o CRV em função dos índices CND foi realizado de maneira semelhante ao que foi feito para o CRH, onde, o volume observado (obtido pela equação 8) e somente para aquelas árvores que teve seu *dap* mensurado, foi relacionado com o volume estimado pela equação ajustada (Tabela 6) para os dados que compreenderam a região FS.

Assim como para o CRH, o relacionamento entre o CRV e os índices CND para os nutrientes e também para G(x) apresentou uma tendência curvilínea (Figura 3), com todas as curvas ajustadas primeiramente pelo modelo polinomial de 2° grau (Tabela 12). As equações se mostraram com boa capacidade explicativa com o R<sup>2</sup>, variando de 55% (B) a 85% G(x). Todos os parâmetros das equações foram significativos a 1% (p<0,01), exceto para os  $\beta_1$  das equações ajustadas para Ca, que foi significativo a 5% (p<0,05) e para Mg e B que foram não significativos.



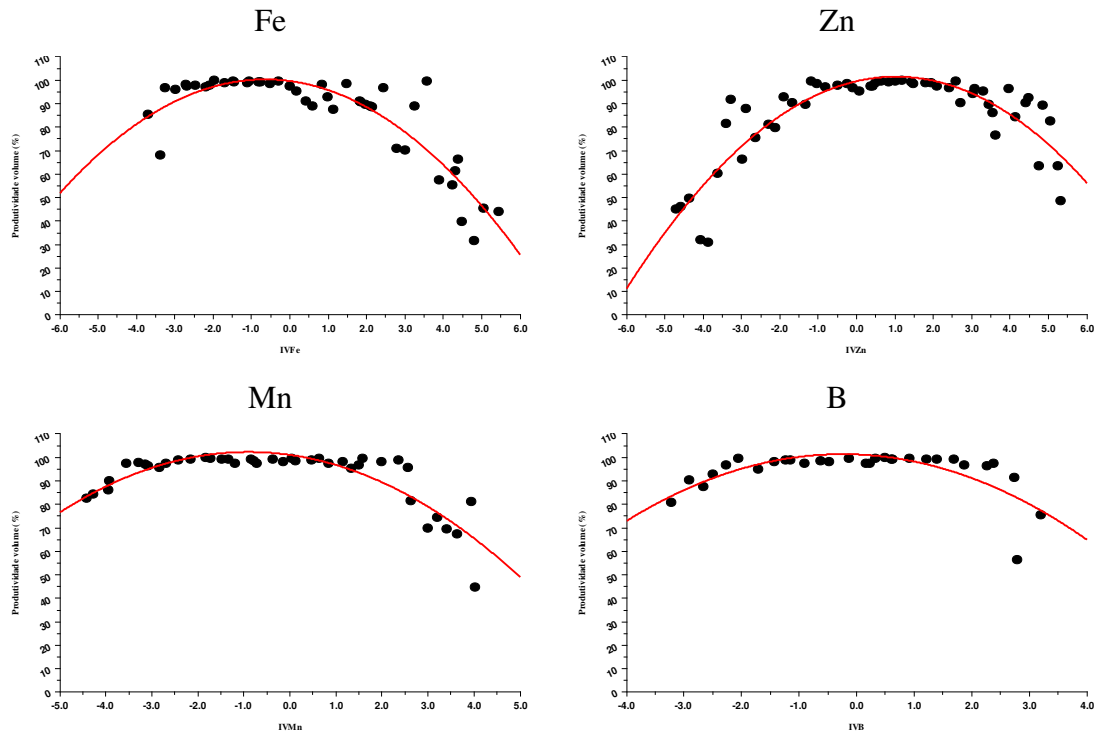


Figura 3: Curvas de respostas potencial nutrientes específicas do crescimento relativo em volume (%) do eucalipto em função dos índices CND para a Média geométrica composicional (G(x)), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Boro (B).

Tabela 12: Equações ajustadas, pelo modelo polinomial de 2° grau, para a região de fronteira superior obtida do relacionamento entre o crescimento relativo em volume e dos índices CND para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B

| Nutriente | Parâmetros do modelo |                       |           | Intervalo                      | R <sup>2</sup> | Significância dos parâmetros | n  |
|-----------|----------------------|-----------------------|-----------|--------------------------------|----------------|------------------------------|----|
|           | $\beta_0$            | $\beta_1$             | $\beta_2$ |                                |                |                              |    |
| G (x)     | 99,058               | -4,104                | -1,251    | - 4,36 $\leq$ IVG $\leq$ 4,52  | 0,85           | p < 0,01                     | 44 |
| N         | 98,513               | 3,154                 | -1,095    | - 4,55 $\leq$ IVN $\leq$ 6,02  | 0,80           | p < 0,01                     | 48 |
| P         | 101,671              | 3,080                 | -3,409    | - 4,04 $\leq$ IVP $\leq$ 3,96  | 0,72           | p < 0,01                     | 49 |
| K         | 96,468               | 6,001                 | -1,616    | - 3,17 $\leq$ IVK $\leq$ 5,55  | 0,70           | p < 0,01                     | 44 |
| Ca        | 101,204              | 1,266                 | -2,396    | - 4,03 $\leq$ IVCa $\leq$ 5,01 | 0,72           | p < 0,01                     | 46 |
| Mg        | 100,951              | - 0,386 <sup>ns</sup> | -1,699    | - 4,39 $\leq$ IVMg $\leq$ 4,10 | 0,67           | p < 0,01                     | 45 |
| S         | 99,496               | -3,328                | -1,480    | - 6,98 $\leq$ IVS $\leq$ 3,08  | 0,66           | p < 0,01                     | 49 |
| Cu        | 97,428               | -2,467                | -0,822    | - 9,60 $\leq$ IVCu $\leq$ 3,74 | 0,70           | p < 0,01                     | 60 |
| Fe        | 99,536               | -2,192                | -1,690    | - 3,71 $\leq$ IVFe $\leq$ 5,45 | 0,81           | p < 0,01                     | 45 |
| Zn        | 99,526               | 3,741                 | -1,531    | - 4,71 $\leq$ IVZn $\leq$ 5,31 | 0,77           | p < 0,01                     | 53 |
| Mn        | 100,982              | -2,771                | -1,531    | - 4,41 $\leq$ IVMn $\leq$ 4,03 | 0,76           | p < 0,01                     | 41 |
| B         | 101,188              | - 1,008 <sup>ns</sup> | -2,018    | - 3,22 $\leq$ IVB $\leq$ 3,20  | 0,55           | p < 0,01                     | 30 |

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação, n: número de observações obtidos na região de fronteira superior.

As curvas ajustadas para a região de fronteira do CRV em função dos índices CND, apresentaram comportamento semelhante ao verificado para o CRH, isto é, o eucalipto também apresentou respostas simétricas quanto ao grau de equilíbrio de todos os nutrientes. Entretanto, mesmo com a existência dessa simetria, verificou-se que, para o CRV, a falta do nutriente é sempre mais importante que o excesso, menos para Fe, Mn e B, em que o excesso desses nutrientes pode limitar mais o crescimento em volume que a falta deles. Já para G(X), diferente do que foi observado considerando o CRH, maiores perdas de crescimento são observadas quando esta variável atinge valores maiores que 1,0.

A abordagem da linha de fronteira para determinar a população de FS do relacionamento entre produtividade e índices de métodos de diagnose nutricional que avaliam o grau de balanço e/ou equilíbrio tem sido utilizada em vários estudos (FERNANDES, 2010; BORGES, 2012; GALDINO, 2015; MENDONÇA, 2016; BAHIA, 2021). Isto porque, esta metodologia é indicada para pesquisas com grandes bases de dados (BLANCO-MACÍAS et al., 2009), principalmente para aqueles oriundos de condições de campo que englobam uma variedade de fatores que influenciam nas produtividades das culturas.

Nos estudos submetidos a condições de experimento, faz-se variar apenas o fator de interesse e os demais fatores são controlados e mantidos constantes. Assim, o padrão de variação da variável resposta é resultado apenas das variações do fator de estudo. Em contrapartida, para dados obtidos em populações de plantios comerciais, a variação da variável resposta é influenciada por outros fatores não controlados e não apenas pelo fator em estudo (GALDINO, 2015). Diante disso, o uso da linha de fronteira é recomendado, pois, ela permite separar, em grandes conjuntos de dados, pontos onde haveria efeito apenas de um dado fator de crescimento

Como o presente estudo compreende uma elevada base de dados, englobando diferentes tipos de genótipos, solos, condições climáticas, entre outros, o uso da linha de fronteira para obter a população de maior produtividade, isolando o efeito apenas de um fator, neste caso, nutricional, foi adequado para gerar as curvas de resposta potencial do crescimento relativo em função dos índices CND, e partir delas obter as faixas de suficiência para plantios de eucalipto situados em diferentes localidades do Brasil.

Além disso, os modelos ajustados, polinomial de 2º grau, também está de encontro com o verificado em outros estudos, como para curvas ajustadas para a produtividade do eucalipto em função dos índices KW e DRIS (FERNANDES, 2010; BORGES, 2012) e mais recentemente para curvas ajustadas para a produtividade do cacaueteiro em função dos índices CND (BAHIA, 2021). Dentre as principais exigências para ajustes de modelos que tem como abordagem a

metodologia de fronteira é que eles devem ser em função de X e a segunda derivada da equação ajustada em função do índice nutricional, deve existir, e ser contínua para o intervalo analisado (SCHNUG et al., 1996). Para estes mesmos autores, os modelos polinomiais são uma boa alternativa de ajuste, sendo o polinomial de 4º grau, o que tem uma aproximação mais significativa da linha de fronteira.

Por outro lado, uma das vantagens de se utilizar o modelo polinomial de 2º grau é a facilidade de encontrar o valor do índice correspondente a produtividade máxima, através da primeira derivada da equação. Nesse sentido, essa verificação foi feita para os índices CND de G(X) e também de todos os nutrientes, considerando tanto as equações ajustadas para o CRH quanto para o CRV (Tabela 13). Os valores máximos das curvas de resposta, considerando o CRH, variaram de -1,62 (Cu) a 1,00 (K). Já os valores máximos das curvas considerando o CRV o menor e o maior índice foram obtidos para G(x) e K, com valores de -1,64 e 1,89, respectivamente.

Tabela 13: Valores dos índices CND que coincidem com o crescimento relativo máximo para altura e volume, crescimento relativo máximo para esses valores de índices CND e crescimento relativo considerando índices CND nulos

|       | IV <sub>imáx</sub> | CRH IV <sub>imáx</sub> | CRH IV <sub>i0</sub> | IV <sub>imáx</sub> | CRV IV <sub>imáx</sub> | CRV IV <sub>i0</sub> |
|-------|--------------------|------------------------|----------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
|       | -----PRH (%)-----  |                        |                      | -----PRV (%)-----  |                        |                      |
| G (x) | -0,474             | 102                    | 99,5*                | -1,64              | 102                    | 94*                  |
| N     | 0,74               | 102                    | 101                  | 1,44               | 101                    | 99                   |
| P     | 0,45               | 103                    | 102                  | 0,45               | 102                    | 102                  |
| K     | 1,00               | 102                    | 101                  | 1,86               | 102                    | 96                   |
| Ca    | 0,08               | 101                    | 101                  | 0,26               | 101                    | 101                  |
| Mg    | 0,56               | 100                    | 100                  | -0,11              | 101                    | 101                  |
| S     | -1,24              | 102                    | 101                  | -1,12              | 101                    | 99                   |
| Cu    | -1,62              | 99                     | 98                   | -1,50              | 99                     | 97                   |
| Fe    | 0,31               | 102                    | 101                  | -0,65              | 100                    | 100                  |
| Zn    | 0,64               | 103                    | 103                  | 1,02               | 101                    | 100                  |
| Mn    | -0,53              | 101                    | 101                  | -0,90              | 102                    | 101                  |
| B     | -0,77              | 102                    | 101                  | -0,25              | 101                    | 101                  |

\*Para a variável G(x) considerou o índice CND igual a 1,0 e não zero; IV<sub>imáx</sub> = valor de índices CND que coincidem com o crescimento máximo; IV<sub>i0</sub> = índices CND com valores nulos; CRH = crescimento relativo em altura; CRV = crescimento relativo em volume; CRH IV<sub>imáx</sub> = Crescimento relativo em altura para o valor do índice CND que coincide com o crescimento máximo; CRV IV<sub>imáx</sub> = Crescimento relativo em volume para o valor do índice CND que coincide com o crescimento máximo; CRH IV<sub>i0</sub> = Crescimento relativo em altura para valores de índices CND nulos; CRV IV<sub>i0</sub> = Crescimento relativo em volume para valores de índices CND nulos.

Os índices CND apresentaram valores negativos, positivos ou nulos, indicando, respectivamente, que os nutrientes podem estar em falta, excesso ou equilibrados nutricionalmente. Assim, esperava-se que o ponto de crescimento relativo máximo, ou seja, o valor de 100% tanto para CRH e CRV coincidissem com o ponto em que o índice CND para cada

nutriente fosse igual a zero. No entanto, para alguns nutrientes isso não foi verificado, onde, as produtividades no ponto zero foram superiores ou inferiores a 100%, porém, com valores bem próximos deste. Essa pequena diferença em relação à 100% pode estar relacionado ao ajuste da equação ou até mesmo por questões de arredondamento. Por outro lado, substituindo os índices CND obtidos pela primeira derivada, ou seja, os índices coincidentes com o ponto de crescimento relativo máximo, verifica-se que, em muitos casos, tanto para CRH quanto a CRV o valor também não é 100%, mesmo obtendo-se valores bem próximos.

Os índices CND dos nutrientes indicam o grau de equilíbrio nutricional, já os índices de  $G(x)$  indicam o grau de balanço nutricional. Segundo Silva (2001) valores de  $G(x)$  menor que 1,0 a planta apresenta, em termos relativos, nutrientes diluídos,  $G(x)$  maior que 1,0 nutrientes concentrados e  $G(x)$  igual 1,0 balanço adequado. Com os resultados obtidos para as CRPNE dos CRH e CRV em função dos índices  $IV_{G(x)}$ , observa-se que os pontos para CRH e CRV máximos foram diferentes de 1,0. Ademais, ao substituir o valor 1,0 nas equações ajustadas para as curvas de crescimento relativo em função dos  $IV_{G(x)}$  os valores para CRH e CRV são menores que 100%, porém bem próximos, sendo 99,5% e 94%, respectivamente.

Esses resultados levam a um questionamento se a interpretação dos índices CND de forma pontual é o suficiente, uma vez que, altas produtividades também podem ser alcançadas quando os índices CND para nutrientes são diferentes de zero e quando estes são diferentes de 1,0 para o  $IV_G$ . Diante disso, o estabelecimento de faixas de suficiência para diagnosticar o grau de equilíbrio e/ou balanço de plantios comerciais de eucalipto no Brasil pelo método CND, pode melhorar a assertividade dos diagnósticos.

Embora o modelo polinomial de 2º grau ser um dos modelos mais utilizados e indicados para o ajuste de equações para a população FS do relacionamento entre o crescimento relativo das culturas em função de índices de diagnósticos nutricionais e, mesmo que, as equações ajustadas no presente estudo utilizando este modelo terem se mostrado bem explicativas, o padrão de distribuição dos dados da FS em função dos índices CND, não se mostraram totalmente quadrático.

Ao verificar a distribuição dos dados do CRH e do CRV em função dos índices CND, observa-se que para todos os relacionamentos a curva de crescimento se divide em três segmentos, sendo o primeiro crescente, o segundo constante e o terceiro decrescente. Esta divisão na curva de crescimento e/ou produção vegetal em partes está relacionada aos regimes nutricionais distintos das culturas, como os regimes de deficiência nutricional, consumo de luxo e toxidez (FAQUIM, 2002; WADT, 2011). Apesar, deste comportamento da curva de crescimento e/ou produção vegetal geralmente ser visualizado em estudos que avaliam a

produção das culturas em função da aplicação de doses crescentes de adubos ou do teor do elemento mineral nos tecidos (BORGES, 2012; BAHIA 2021, FERREIRA, 2015), os resultados obtidos no presente estudo, demonstram que a divisão destas curvas de respostas em diferentes segmentos, também é observada quando as mesmas são geradas em função de índices de equilíbrios nutricionais, como os índices CND.

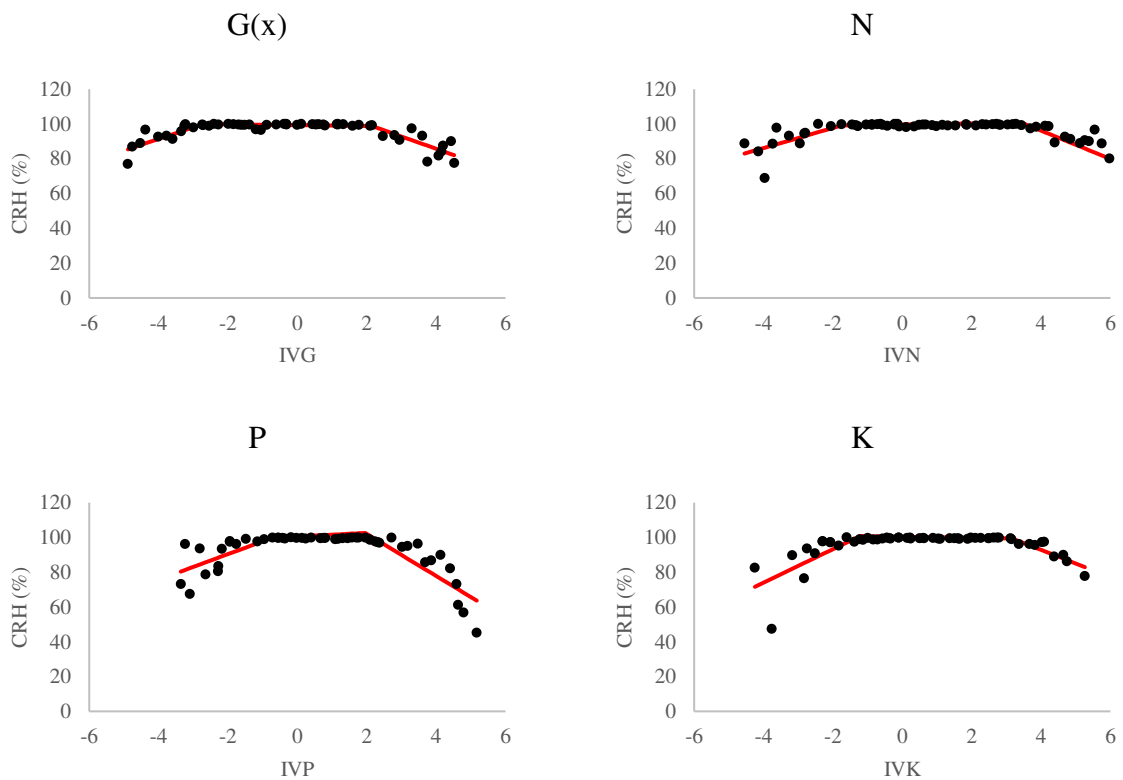
De acordo com os gráficos das figuras 2 e 3 observa-se que, tanto para  $G(x)$  quanto para todos os nutrientes, há um segmento crescente quando os valores dos índices CND variam do negativo para o positivo. À medida que os valores dos índices CND aumentam até alcançarem um valor limite, denominado  $K_1$ , o CR aumenta atingindo valores próximos a 100%. A partir de  $K_1$ , mesmo com os valores dos índices CND aumentando, o CR fica constante em forma de platô, até que os índices CND atinja outro valor limite, denominado  $K_2$ . A partir deste, o segmento se torna decrescente, ou seja, valores dos índices CND superiores a  $K_2$  proporciona decréscimos no CR.

Nos estudos que modelam a curva de produção vegetal em resposta a doses crescente de adubos, o primeiro segmento ilustra o regime de deficiência nutricional, onde a planta demonstra resposta a fertilização e tem a sua produção aumentada até certo ponto. A partir deste, mesmo com os incrementos nos níveis de fertilização, a cultura deixa de responder e a curva se estagna em um valor de produção ótimo. Esta região é denominada de regime de consumo de luxo. Por fim, à medida que as doses se tornam mais elevadas, a produção decresce, caracterizando o regime nutricional de toxidez (FERREIRA, 2015). Considerando que o CND avalia o equilíbrio nutricional das culturas, as CRPNE geradas indicam os valores dos índices CND correspondentes aos desequilíbrios nutricionais por deficiência dos nutrientes, níveis adequados a consumo de luxo e desequilíbrios nutricionais por excesso.

Em grande parte dos estudos na área da nutrição mineral de plantas o modelo comumente utilizado para ajustar as curvas de crescimento e/ou produção vegetal em função do teor do nutriente no tecido é o polinomial de 2º grau (FERNANDES, 2010; BORGES, 2012; BAHIA 2021). Segundo Ferreira (2015) este modelo apresenta um máximo de produção, em que o platô de resposta não é considerado. Para este mesmo autor, o modelo polinomial de 2º grau é adequado para descrever situações nas quais o consumo de luxo não é pronunciado, porém, em estudos em que é necessário considerar o regime nutricional de consumo de luxo, existem alternativas melhores. Diante disso e devido às características das tendências em outros estudos (BORGES, 2012; BAHIA 2021), além do modelo polinomial de 2º grau empregou-se a RDLP (Eq 19). Assim, novas equações foram ajustadas para todos os nutrientes e para  $G(x)$ .

No relacionamento entre o CRH e os índices CND, as curvas obtidas pela RDLP se ajustaram melhor aos dados quando comparadas com as curvas ajustadas pelo modelo polinomial de 2º grau (Figura 4). Observa-se simetria dos dados para  $G(x)$  e alguns nutrientes como N, Ca, S e Mn e assimetria para os outros nutrientes, onde verifica-se que o excesso de nutrientes como P, Zn e B influencia mais na redução do CRH que a sua deficiência. Já para o K, Mg e Cu a deficiência do nutriente tem maior influência no CRH que o seu excesso.

As equações ajustadas se mostraram com boa capacidade explicativa com valores de  $R^2$  variando de 64% (N, K e Fe) a 92% (Mg) (Tabela 14). Estes, foram bem semelhantes e ligeiramente superiores aos valores de  $R^2$  obtidos pelo modelo polinomial de 2º grau, com exceção do P que apresentou o  $R^2$  menor no ajuste realizado pela RDLP. Além disso, todos os parâmetros das equações ajustadas por este modelo foram significativos a 1% ( $p < 0,01$ ), exceto para  $\beta_0$ .



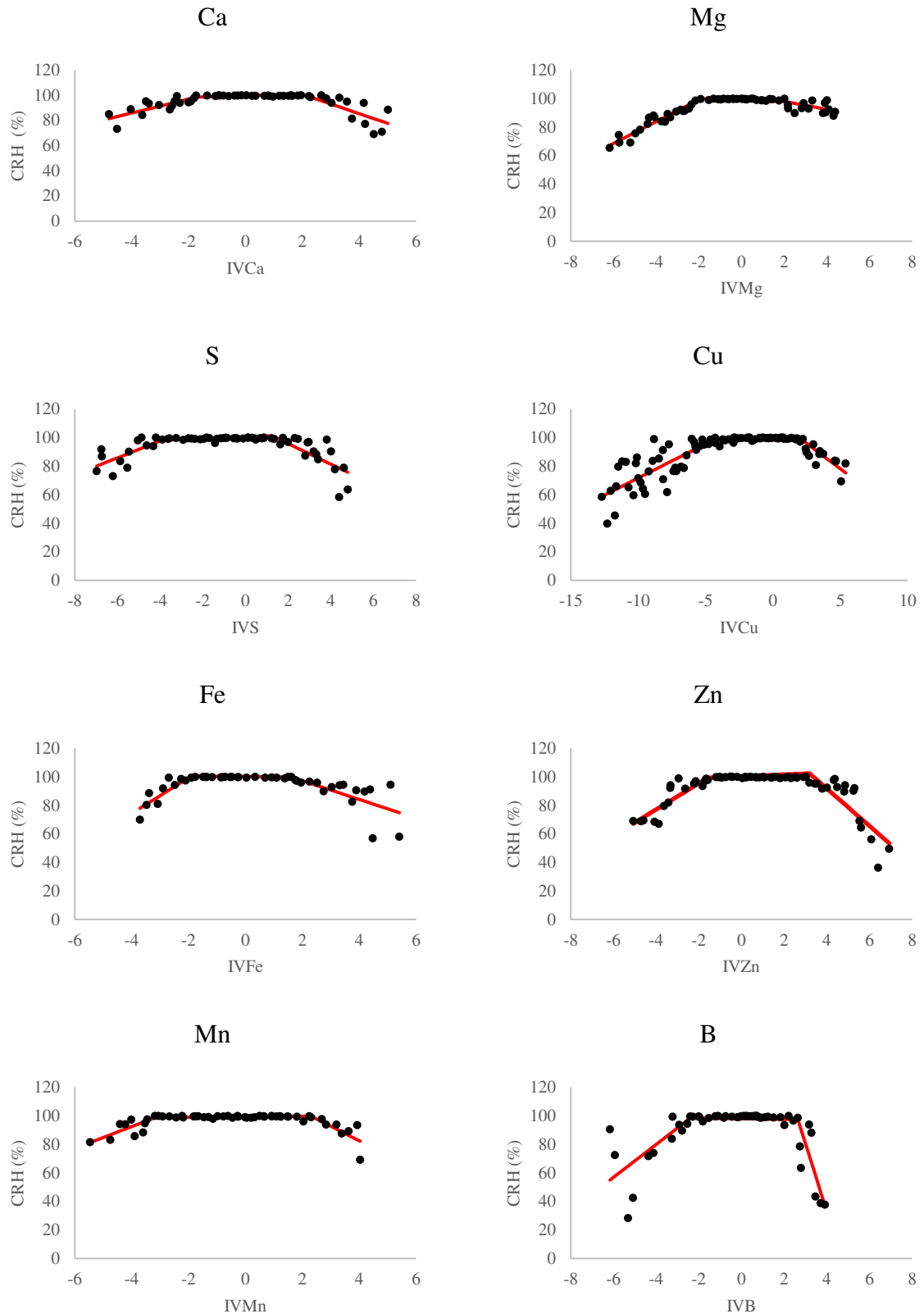


Figura 4: Curvas de respostas potencial nutrientes específicas, ajustadas pela regressão duplo linear com resposta platô, do crescimento relativo em altura (%) do eucalipto em função dos índices CND para a Média geométrica composicional ( $G(x)$ ), Nitrogênio (N), Fósforo (P),

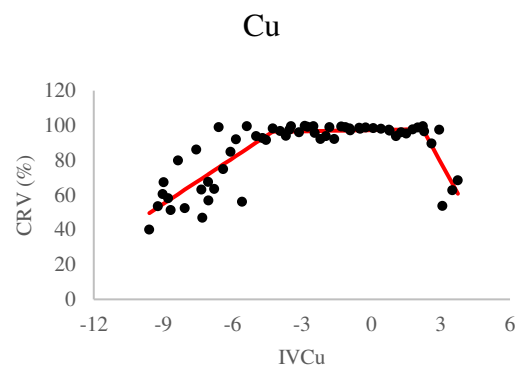
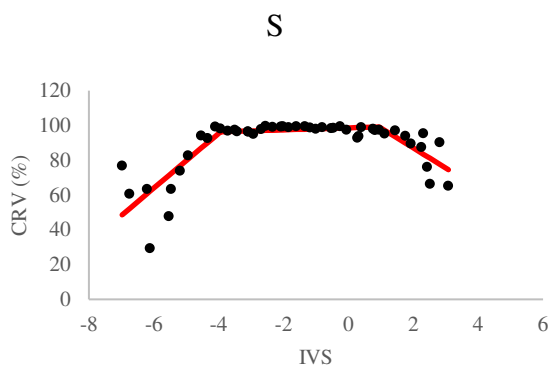
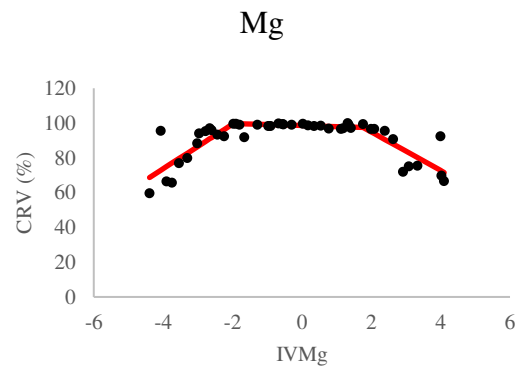
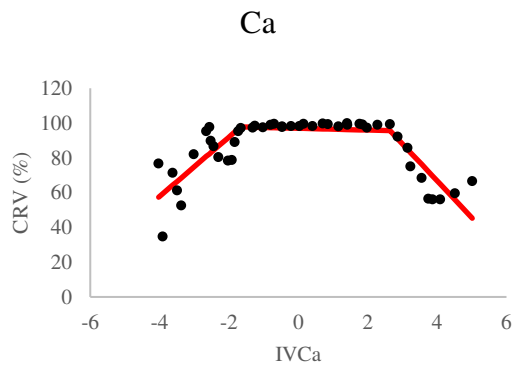
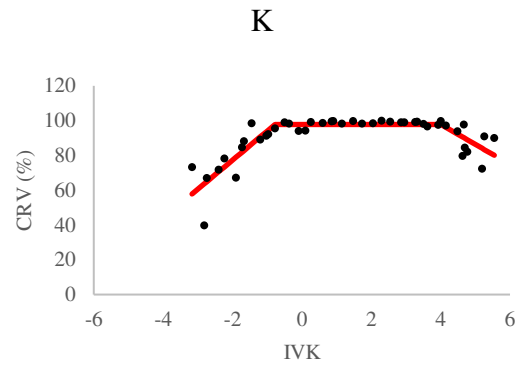
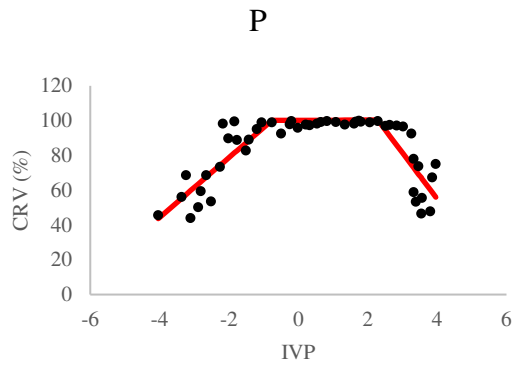
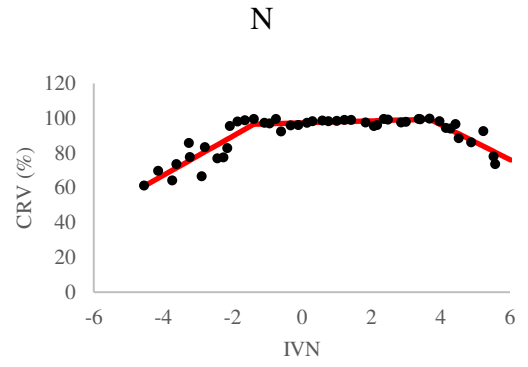
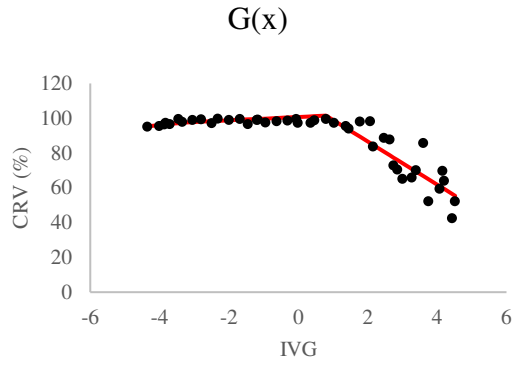
Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Boro (B).

Tabela 14: Equações ajustadas, pela regressão duplo linear com resposta platô, para a região de fronteira superior obtida do relacionamento entre o crescimento relativo em altura em função dos índices CND para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B

| Nutriente | Parâmetros do modelo  |           |           |           | Intervalo             | R <sup>2</sup> | Significância dos parâmetros |    |
|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|----------------|------------------------------|----|
|           | $\beta_0$             | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ |                       |                | n                            |    |
| G (x)     | 99,361 <sup>ns</sup>  | - 0,235   | 6,958     | -6,842    | - 4,88 ≤ IVG ≤ 4,52   | 0,79           | p<0,01                       | 55 |
| N         | 99,702 <sup>ns</sup>  | 0,311     | 5,427     | -8,417    | - 4,53 ≤ IVN ≤ 6,37   | 0,64           | p<0,01                       | 64 |
| P         | 100,571 <sup>ns</sup> | 1,010     | 6,349     | -13,102   | - 3,36 ≤ IVP ≤ 5,17   | 0,73           | p<0,01                       | 52 |
| K         | 100,368 <sup>ns</sup> | - 0,292   | 9,910     | -7,512    | - 4,25 ≤ IVK ≤ 5,26   | 0,64           | p<0,01                       | 57 |
| Ca        | 99,715 <sup>ns</sup>  | - 0,736   | 4,821     | -8,436    | - 4,80 ≤ IVCa ≤ 5,01  | 0,72           | p<0,01                       | 52 |
| Mg        | 98,975 <sup>ns</sup>  | - 0,502   | 8,148     | -2,265    | - 6,18 ≤ IVMg ≤ 4,40  | 0,92           | p<0,01                       | 62 |
| S         | 100,646 <sup>ns</sup> | 0,599     | 5,317     | -7,775    | - 6,98 ≤ IVS ≤ 4,79   | 0,68           | p<0,01                       | 62 |
| Cu        | 98,361 <sup>ns</sup>  | - 0,182   | 4,976     | -6,975    | - 13,23 ≤ IVCu ≤ 5,40 | 0,74           | p<0,01                       | 91 |
| Fe        | 100,175 <sup>ns</sup> | - 0,221   | 12,705    | -6,366    | - 3,71 ≤ IVFe ≤ 5,41  | 0,64           | p<0,01                       | 46 |
| Zn        | 100,269 <sup>ns</sup> | 0,637     | 8,539     | -13,705   | - 5,07 ≤ IVZn ≤ 6,94  | 0,80           | p<0,01                       | 64 |
| Mn        | 99,317 <sup>ns</sup>  | 0,176     | 7,491     | -10,300   | - 5,46 ≤ IVMn ≤ 4,03  | 0,72           | p<0,01                       | 53 |
| B         | 97,971 <sup>ns</sup>  | - 0,226   | 11,750    | -47,296   | - 6, 16 ≤ IVB ≤ 3,92  | 0,68           | p<0,01                       | 53 |

A RDLP também apresentou melhor ajuste aos dados quando comparada com a polinomial de 2º grau ao considerar o relacionamento entre o CRV e os índices CND (Figura 5). Nota-se que para G(x), o CRV máximo inicia constante com valores de G(x) menores que zero e reduz significativamente quando G(x) atinge valores superiores a 1,0. Nutrientes como N, K, S, Cu e Zn tem maior influência no crescimento quando estes estão em deficiência, ao contrário do que ocorre para Fe, Mn e B, em que a limitação do crescimento é mais significativa quando estes encontram em excesso. Já nutrientes como o P, Ca e Mg, a resposta tende a ser simétrica, onde a limitação do crescimento em volume pode ocorrer tanto na falta quanto no excesso desses nutrientes.

As equações ajustadas para o CRV em função dos índices CND pela RDLP foram explicativas com R<sup>2</sup> variando de 64% (B) a 87% (G(x)) (Tabela 15). Estes valores de R<sup>2</sup> também foram semelhantes e ligeiramente superiores quando comparados com os obtidos pelas equações ajustadas para o CRV pelo modelo polinomial de 2º, com exceção do Fe e Zn em que, os valores de R<sup>2</sup> foram iguais no ajuste de ambos os modelos. Ademais, todos os parâmetros obtidos pela RDLP foram significativos a 1%, exceto para  $\beta_0$ .



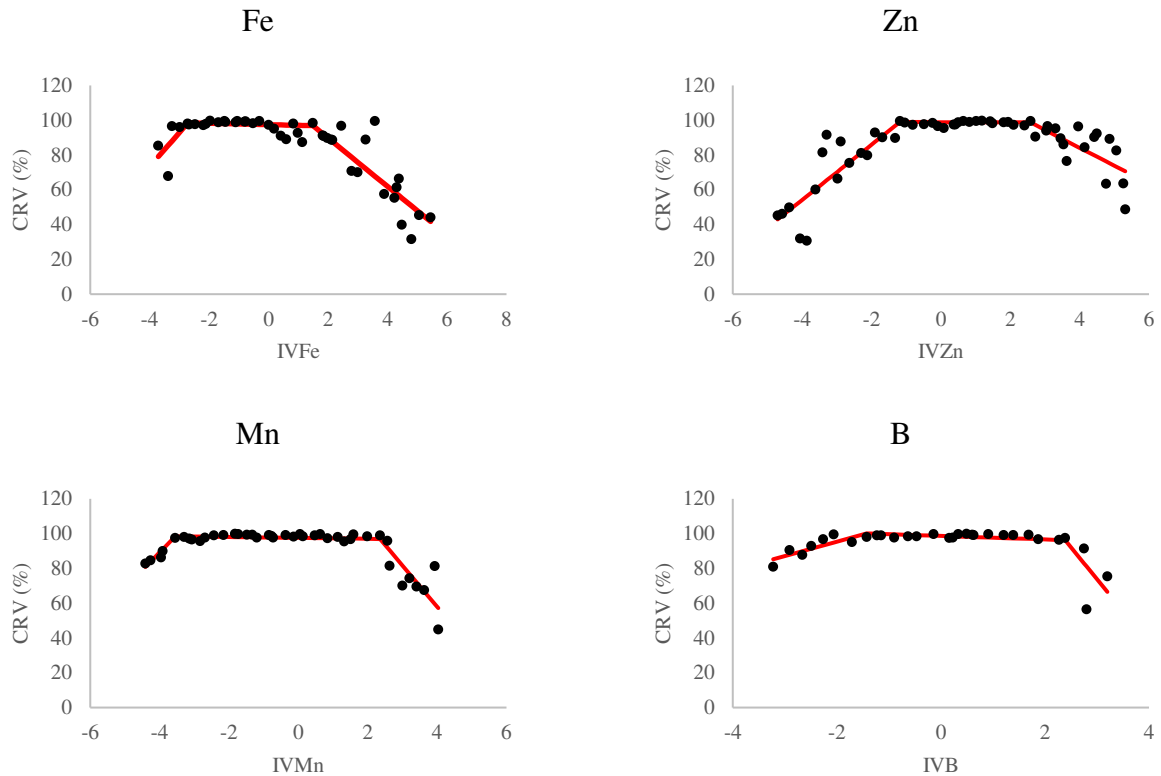


Figura 5: Curvas de respostas potencial nutrientes específicas, ajustadas pela regressão duplo linear com resposta platô, do crescimento relativo em volume (%) do eucalipto em função dos índices CND para a Média geométrica composicional (G(x)), Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn) e Boro (B).

Tabela 15: Equações ajustadas, pela regressão duplo linear com resposta platô, para a região de fronteira superior obtida do relacionamento entre o crescimento relativo em volume em função dos índices CND para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B

| Nutriente | Parâmetros do modelo  |           |           |                | Intervalo            | R <sup>2</sup> | Significância dos parâmetros | n  |
|-----------|-----------------------|-----------|-----------|----------------|----------------------|----------------|------------------------------|----|
|           | $\beta_0$             | $\beta_1$ | $\beta_2$ | B <sub>3</sub> |                      |                |                              |    |
| G (x)     | 100,730 <sup>ns</sup> | 0,9676    | 1,174     | -13,365        | - 4,36 ≤ IVG ≤ 4,52  | 0,87           | p < 0,01                     | 44 |
| N         | 97,320 <sup>ns</sup>  | 0,575     | 10,664    | -10,604        | - 4,55 ≤ IVN ≤ 6,02  | 0,85           | p < 0,01                     | 48 |
| P         | 100,165 <sup>ns</sup> | 0,078     | 17,140    | -26,633        | - 4,04 ≤ IVP ≤ 3,96  | 0,75           | p < 0,01                     | 49 |
| K         | 97,805 <sup>ns</sup>  | 0,005     | 16,683    | -11,559        | - 3,17 ≤ IVK ≤ 5,55  | 0,73           | p < 0,01                     | 44 |
| Ca        | 96,924 <sup>ns</sup>  | - 0,502   | 17,607    | -20,728        | - 4,03 ≤ IVCa ≤ 5,01 | 0,73           | p < 0,01                     | 46 |
| Mg        | 98,547 <sup>ns</sup>  | -0,599    | 13,426    | -10,482        | - 4,39 ≤ IVMg ≤ 4,10 | 0,70           | p < 0,01                     | 45 |
| S         | 98,588 <sup>ns</sup>  | 0,578     | 15,171    | -12,081        | - 6,98 ≤ IVS ≤ 3,08  | 0,70           | p < 0,01                     | 49 |
| Cu        | 97,312 <sup>ns</sup>  | 0,225     | 8,542     | -24,731        | - 9,60 ≤ IVCu ≤ 3,74 | 0,74           | p < 0,01                     | 60 |
| Fe        | 97,457 <sup>ns</sup>  | - 0,383   | 19,951    | -13,520        | - 3,71 ≤ IVFe ≤ 5,45 | 0,81           | p < 0,01                     | 45 |
| Zn        | 98,905 <sup>ns</sup>  | - 0,041   | 15,912    | -10,278        | - 4,71 ≤ IVZn ≤ 5,31 | 0,77           | p < 0,01                     | 53 |
| Mn        | 97,548 <sup>ns</sup>  | -0,253    | 20,601    | -23,383        | - 4,41 ≤ IVMn ≤ 4,03 | 0,84           | p < 0,01                     | 41 |
| B         | 98,685 <sup>ns</sup>  | - 1,008   | 9,276     | -35,588        | - 3,22 ≤ IVB ≤ 3,20  | 0,64           | p < 0,01                     | 30 |

Analisando os resultados obtidos para as CRPNE, verifica-se nitidamente a existência de uma faixa constante de crescimento máximo dos plantios de eucalipto tanto em altura quanto volume, em função dos índices CND. Isso mostra que o uso de modelos quadráticos para o ajuste dessas curvas não seria o mais adequado e sim a adoção de um modelo que leva em consideração essa faixa (platô), em que, mesmo variando o valor do índice CND o crescimento máximo continua constante.

Estes resultados confirmam que, a interpretação dos índices CND de maneira pontual, ou seja, comparando-os com zero, não seja o suficiente e que o mais adequado é a existência de faixas de suficiência para a interpretação da diagnose nutricional realizada pelo CND.

#### **4.6.Faixas de Suficiência**

A partir das equações ajustadas, entre o relacionamento do CRH e do CRV em função dos índices CND foram estabelecidos os limites das FSU para plantios de eucalipto distribuídos em várias localidades do Brasil, considerando tanto as equações ajustadas pelo modelo polinomial de 2º grau quanto para aquelas ajustadas pela RDLP (Tabelas 16 e 17).

As FSU, obtidas por cada uma das equações, foram estabelecidas para cada macro, micronutriente e para  $G(x)$ . Verifica-se que as amplitudes das FSU se diferem em relação as equações utilizadas, entre os nutrientes e entre  $G(x)$ , tanto para a CRH quanto para CRV.

Tabela 16: Limites das faixas de suficiência propostos para os índices CND de G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em folhas de eucalipto, derivados do método da fronteira, e obtidas pelo ajuste das equações utilizando o modelo polinomial de 2º grau e a regressão duplo linear com resposta platô, considerando o crescimento relativo em altura

|   | Deficiente |                 | Tendência a Deficiente | Suficiente      | Alto            | Tendência a Excesso | Excesso  |
|---|------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------|
|   | < 70% CR   | 70% ≤ CR < 90%  |                        | 90% ≤ CR < 100% | 100% ≥ CR > 90% | 90% ≥ CR > 70%      | ≤ 70% CR |
| -----Modelo polinomial 2º grau-----                 |            |                 |                        |                 |                 |                     |          |
| G (x)   | < -6,88    | -6,88 a -4,18   |                        | -4,18 a -0,56   | - 0,56 a 3,22   | 3,22 a 5,94         | ≥ 5,94   |
| N   | < -5,86    | -5,86 a -3,08   |                        | -3,08 a 0,82    | 0,82 a 4,54     | 4,54 a 7,33         | ≥ 7,33   |
| P   | < -3,64    | -3,64 a -1,92   |                        | -1,92 a 0,39    | 0,39 a 2,8      | 2,8 a 4,53          | ≥ 4,53   |
| K   | < -4,41    | -4,41 a -2,12   |                        | -2,12 a 0,93    | 0,93 a 4,12     | 4,12 a 6,40         | ≥ 6,40   |
| Ca  | < -5,57    | -5,57 a -3,18   |                        | -3,18 a 0,01    | 0,01 a 3,34     | 3,34 a 5,73         | ≥ 5,73   |
| Mg  | < -5,82    | -5,82 a -3,13   |                        | -3,13 a 0,47    | 0,47 a 4,23     | 4,23 a 6,93         | ≥ 6,93   |
| S   | < -7,88    | -7,88 a -5,08   |                        | -5,08 a -1,33   | -1,33 a 2,59    | 2,59 a 5,39         | ≥ 5,39   |
| Cu  | < -12,17   | -12,17 a -7,60  |                        | -7,60 a -1,51   | -1,51 a 4,87    | 4,87 a 9,43         | ≥ 9,43   |
| Fe  | < -4,70    | -4,70 a -2,59   |                        | -2,59 a 0,23    | 0,23 a 3,19     | 3,19 a 5,30         | ≥ 5,30   |
| Zn  | < -4,38    | -4,38 a -2,26   |                        | -2,26 a 0,57    | 0,57 a 3,53     | 3,53 a 5,65         | ≥ 5,65   |
| Mn  | < -4,40    | -4,40 a -2,64   |                        | -2,64 a -0,29   | -0,29 a 2,18    | 2,18 a 3,94         | ≥ 3,94   |
| B   | < -4,85    | -4,85 a -3,13   |                        | -3,13 a -0,83   | -0,83 a 1,57    | 1,57 a 3,29         | ≥ 3,29   |
| -----Regressão duplo linear com resposta platô----- |            |                 |                        |                 |                 |                     |          |
| G (x)   | < - 6,58   | - 6,58 a - 3,73 |                        | - 3,73 a 1,15   | 1,15 a 2,65     | 2,65 a 5,64         | ≥ 5,64   |
| N   | < -6,74    | - 6,74 a -3,23  |                        | -3,23 a 3,42    | 3,42 a 4,67     | 4,67 a 7,16         | ≥ 7,16   |
| P   | < -4,54    | -4,54 a -1,75   |                        | -1,75 a 1,95    | 1,95 a 2,80     | 2,80 a 4,50         | ≥ 4,50   |
| K   | < -4,37    | -4,37 a -2,27   |                        | -2,27 a - 1,23  | - 1,23 a 4,27   | 4,27 a 6,85         | ≥ 6,85   |
| Ca  | < -5,71    | -5,71 a -3,07   |                        | -3,07 a 1,95    | 1,95 a 3,27     | 3,27 a 5,89         | ≥ 5,89   |
| Mg  | < -5,83    | -5,83 a -3,21   |                        | -3,21 a - 1,91  | - 1,91 a 4,92   | 4,92 a 12,15        | ≥ 12,15  |
| S   | < -8,53    | -8,53 a -5,10   |                        | -5,10 a 1,22    | 1,22 a 2,64     | 2,64 a 5,46         | ≥ 5,46   |
| Cu  | < -10,49   | -10,49 a -6,35  |                        | -6,35 a -4,29   | -4,29 a 3,45    | 3,45 a 6,22         | ≥ 6,22   |
| Fe  | < -4,32    | -4,32 a -2,71   |                        | -2,71 a - 1,91  | - 1,91 a 3,02   | 3,02 a 3,08         | ≥ 3,08   |
| Zn  | < -4,59    | -4,59 a -2,36   |                        | -2,36 a 3,18    | 3,18 a 3,97     | 3,97 a 5,53         | ≥ 5,53   |
| Mn  | < -6,97    | -6,97 a -4,36   |                        | -4,36 a 2,28    | 2,28 a 3,29     | 3,29 a 5,26         | ≥ 5,26   |
| B   | < -4,96    | -4,96 a -3,25   |                        | -3,25 a -2,40   | -2,40 a 2,83    | 2,83 a 3,24         | ≥ 3,24   |

CR = crescimento relativo

Tabela 17: Limites das faixas de suficiência propostos para os índices CND de G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em folhas de eucalipto, derivados do método da fronteira, e obtidas pelo ajuste das equações utilizando o modelo polinomial de 2º grau e a regressão duplo linear com resposta platô, considerando o crescimento relativo em volume

|   | Deficiente | Tendência a Deficiente | Suficiente             | Alto                   | Tendência a Excesso   | Excesso        |
|---|------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|
|   | < 70% PR   | $70\% \leq PR < 90\%$  | $90\% \leq PR < 100\%$ | $100\% \geq PR > 90\%$ | $90\% \geq PR > 70\%$ | $\leq 70\% PR$ |
| -----Modelo polinomial de 2º grau-----              |            |                        |                        |                        |                       |                |
|   |            |                        | --                     |                        |                       |                |
| G (x)   | < -6,60    | -6,60 a -4,51          | -4,51 a -1,71          | -1,71 a 1,22           | 1,22 a 3,31           | $\geq 3,31$    |
| N   | < -3,82    | -3,82 a -1,60          | -1,60 a 1,37           | 1,37 a 4,47            | 4,47 a 6,49           | $\geq 6,49$    |
| P   | < -2,55    | -2,55 a -1,29          | -1,29 a 0,41           | 0,41 a 2,18            | 2,18 a 3,45           | $\geq 3,45$    |
| K   | < -2,55    | -2,55 a -0,66          | -0,66 a 1,80           | 1,80 a 4,37            | 4,37 a 6,20           | $\geq 6,20$    |
| Ca  | < -3,30    | -3,30 a -1,80          | -1,80 a 0,21           | 0,21 a 2,32            | 2,32 a 3,82           | $\geq 3,82$    |
| Mg  | < -4,34    | -4,34 a -2,56          | -2,56 a -0,17          | - 0,17 a 2,30          | 2,30 a 4,10           | $\geq 4,10$    |
| S   | < -5,66    | -5,66 a -3,75          | -3,75 a -1,20          | - 1,20 a 1,49          | 1,49 a 3,40           | $\geq 3,40$    |
| Cu  | < -7,52    | - 7,52 a -4,98         | -4,98 a -1,58          | - 1,58 a 1,79          | 1,79 a 4,41           | $\geq 4,41$    |
| Fe  | < -4,87    | -4,87 a -3,09          | -3,09 a -0,71          | - 0,71 a 1,78          | 1,78 a 3,57           | $\geq 3,57$    |
| Zn  | < -3,06    | -3,06 a -1,34          | -1,34 a 0,96           | 0,96 a 3,37            | 3,37 a 5,01           | $\geq 5,01$    |
| Mn  | < -5,39    | -5,39 a -3,49          | -3,49 a -0,97          | -0,97 a 1,67           | 1,67 a 3,57           | $\geq 3,57$    |
| B   | < -4,14    | -4,14 a -2,50          | -2,50 a -0,30          | -0,30 a 1,99           | 1,99 a 3,63           | $\geq 3,63$    |
| -----Regressão duplo linear com resposta platô----- |            |                        |                        |                        |                       |                |
| G (x)   | < - 6,58   | - 15,70 a -6,22        | - 6,22 a 0,79          | 0,79 a 1,53            | 1,53 a 3,25           | $\geq 3,25$    |
| N   | < -3,78    | -3,78 a -2,01          | -2,01 a 3,67           | 3,67 a 4,67            | 4,67 a 6,65           | $\geq 6,65$    |
| P   | < -2,50    | -2,50 a -1,33          | -1,33 a 2,22           | 2,22 a 2,67            | 2,67 a 3,42           | $\geq 3,42$    |
| K   | < -2,53    | -2,53 a -1,36          | -1,36 a 3,13           | 3,13 a 4,85            | 4,85 a 6,54           | $\geq 6,54$    |
| Ca  | < -3,38    | -3,38 a -2,24          | -2,24 a -1,67          | - 1,67 a 2,95          | 2,95 a 3,92           | $\geq 3,92$    |
| Mg  | < -4,31    | -4,31 a -2,75          | -2,75 a -1,98          | - 1,98 a 2,46          | 2,46 a 4,26           | $\geq 4,26$    |
| S   | < -5,66    | -5,66 a -4,40          | -4,40 a 0,94           | 0,94 a 1,80            | 1,80 a 3,53           | $\geq 3,53$    |
| Cu  | < -7,45    | - 7,45 a -5,22         | -5,22 a 2,20           | 2,20 a 2,62            | 2,62 a 3,42           | $\geq 3,42$    |
| Fe  | < -4,23    | -4,23 a -3,23          | -3,23 a -2,73          | - 2,73 a 2,07          | 2,07 a 3,49           | $\geq 3,49$    |
| Zn  | < -3,06    | -3,06 a -1,81          | -1,81 a - 1,19         | -1,19 a 3,52           | 3,52 a 5,44           | $\geq 5,44$    |
| Mn  | < -5,00    | -5,00 a -4,03          | -4,03 a -3,56          | -3,56 a 2,07           | 2,07 a 3,53           | $\geq 3,53$    |
| B   | < -5,06    | -5,06 a -2,64          | -2,64 a -1,44          | -1,44 a 2,55           | 2,55 a 3,10           | $\geq 3,10$    |

CR = crescimento relativo

O uso de FSU em programas de monitoramento nutricional pode ser considerado vantajoso quando comparado a valores de referência pontuais, uma vez que, as FSU melhoram a flexibilidade da diagnose. Porém, quando os limites dessas faixas são muito amplos o diagnóstico é menos preciso (CANTARUTTI et., 2007). De acordo com Guimarães et al. (2015) quanto maior o limite das FSU maior a probabilidade de se obter o teor nutricional de determinada amostra dentro desta faixa, em contrapartida, quando a faixa é estreita essa probabilidade é reduzida e o resultado obtido é mais preciso.

Alguns estudos já estabeleceram faixas de suficiência nutricional para o eucalipto considerando métodos de interpretação de análise foliar como o NC, KW e DRIS (FERNANDES, 2010; GALDINO, 2015), sendo que, na maioria deles os plantios

encontravam-se em idades jovens ou próximas a idade de corte. Além disso, muitas dessas faixas foram estabelecidas apenas para macronutrientes. Assim, as FSU estabelecidas no presente estudo, são as primeiras obtidas pelo CND para a cultura do eucalipto, considerando macro e micronutrientes, compreendendo plantios em diferentes idades (cerca de 1,0 a 6,0 anos), com diferentes genótipos e englobando uma gama de técnicas silviculturais praticadas no Brasil.

Como o DRIS é um método de diagnose nutricional mais próximo do CND, visto que, ele também avalia o grau de equilíbrio nutricional, as FSU obtidas no presente estudo foram comparadas com as FSU obtidas pelo DRIS nos trabalhos realizados por Fernandes (2010) e Galdino (2015) (Tabela 18).

Tabela 18: Faixas de suficiência propostas para o DRIS para plantios de eucalipto no Brasil

|                               | Deficiente | Tendência a Deficiente | Suficiente      | Alto            | Tendência a Excesso | Excesso  |
|-------------------------------|------------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------|
|                               | < 70% CR   | 70% ≤ CR < 90%         | 90% ≤ CR < 100% | 100% ≥ CR > 90% | 90% ≥ CR > 70%      | ≤ 70% CR |
| Fernandes (2010) <sup>1</sup> |            |                        |                 |                 |                     |          |
| N                             | < -0,42    | -0,42 a -0,21          | -0,20 a 0,06    | 0,07 a 0,32     | 0,32 a 0,54         | ≥ 0,54   |
| P                             | < -0,51    | -0,51 a -0,26          | -0,25 a 0,05    | 0,06 a 0,36     | 0,37 a 0,61         | ≥ 0,61   |
| K                             | < -0,81    | -0,81 a -0,48          | -0,47 a -0,06   | -0,05 a 0,33    | 0,34 a 0,67         | ≥ 0,67   |
| Ca                            | < -0,85    | -0,85 a -0,43          | -0,42 a 0,09    | 0,10 a 0,60     | 0,61 a 1,02         | ≥ 1,02   |
| Mg                            | < -0,61    | -0,61 a -0,33          | -0,32 a 0,04    | 0,05 a 0,40     | 0,41 a 0,69         | ≥ 0,69   |
| S                             | < -0,72    | -0,72 a -0,36          | -0,35 a 0,11    | 0,12 a 0,57     | 0,58 a 0,94         | ≥ 0,94   |
| Cu                            | < -0,61    | -0,61 a -0,33          | -0,32 a 0,02    | 0,03 a 0,37     | 0,38 a 0,66         | ≥ 0,66   |
| Fe                            | < -0,71    | -0,71 a -0,43          | -0,42 a -0,08   | -0,07 a 0,26    | 0,27 a 0,54         | ≥ 0,54   |
| Zn                            | < -0,63    | -0,63 a -0,37          | -0,36 a -0,03   | -0,02 a 0,30    | 0,31 a 0,57         | ≥ 0,57   |
| Mn                            | < -1,04    | -1,04 a -0,58          | -0,57 a -0,01   | 0,00 a 0,56     | 0,57 a 1,03         | ≥ 1,03   |
| B                             | < -0,90    | -0,90 a -0,54          | -0,53 a -0,08   | -0,07 a 0,38    | 0,38 a 0,76         | ≥ 0,76   |
| Galdino (2015) <sup>2</sup>   |            |                        |                 |                 |                     |          |
| N                             | < -1,961   | -1,961 a -1,173        | -1,173 a 0,274  | 0,274 a 3,020   | 3,020 a 7,416       | ≥ 7,416  |
| P                             | < -1,745   | -1,745 a -1,092        | -1,092 a 0,000  | 0,000 a 1,663   | 1,663 a 3,887       | ≥ 3,887  |
| K                             | < -4,503   | -4,503 a -3,123        | -3,123 a 0,700  | 0,700 a 10,017  | 10,017 a 19,490     | ≥ 19,490 |
| Zn                            | < -2,246   | -2,246 a -1,205        | -1,205 a 0,500  | 0,500 a 2,663   | 2,663 a 4,617       | ≥ 4,617  |
| B                             | < -2,702   | -2,702 a -1,843        | -1,843 a -0,007 | -0,07 a 3,280   | 3,280 a 8,638       | ≥ 8,638  |

<sup>1</sup>Proposta de faixas de suficiência para plantios de eucalipto com até 2,2 anos de idade no estado de São Paulo, considerando o crescimento relativo em altura. <sup>2</sup>Proposta de faixas de suficiência para plantios de eucalipto de 1,0 a 6,0 anos em várias localidades do país, considerando o crescimento relativo em volume de tronco.

Verifica-se que as FSU obtidas pelo CND neste estudo, tanto para a CRH quanto para a CRV, foram mais amplas que as obtidas pelo DRIS na literatura. Vale ressaltar que nos trabalhos citados na Tabela 18, a metodologia para obter as FSU também foi pela linha de fronteira, onde ajustou-se as curvas para a população FS entre o relacionamento dos índices DRIS com o crescimento relativo. Considerando a FSU, para a CRH (Tabela 16), da classe suficiente (90% ≤ CR < 100%), maiores diferenças quanto aos limites inferiores e superiores

desta classe foram observadas ao comparar com os resultados de Fernandes (2010), destacando maior diferença para o Cu, em que, o limite inferior da FSU deste nutriente foi cerca de 20 vezes maior no presente estudo tanto para as FSU obtidas pelo modelo polinomial de 2º grau quanto para aquelas obtidas pela RDLP.

As FSU estabelecidas pelo DRIS por Galdino (2015), na classe suficiente, também foram mais estreitas para todos os nutrientes, exceto para K, quando comparadas com as FSU obtidas no presente estudo pelo modelo polinomial de 2º grau, para a mesma classe e considerando a CRV (Tabela 17). A FSU para K obtida pelo CND reduziu o seu limite inferior cerca de 4 vezes quando comparada com a FSU obtida pelo DRIS. Embora, as FSU obtidas pelo autor citado foram mais estreitas que as do presente estudo, as diferenças não foram de magnitudes tão elevadas como observadas ao comparar com os resultados de Fernandes (2010). Entretanto, ao comparar com as FSU obtidas pela RDLP, as amplitudes obtidas por Galdino (2015) para a classe suficiente são mais estreitas que as obtidas no presente estudo.

Maiores amplitudes das FSU obtidas neste trabalho quando comparadas com as obtidas na literatura é devido as diferenças nas condições de estudo e nas metodologias utilizadas. No trabalho realizado por Fernandes (2010) os dados abrangiam povoamentos mais jovens de eucalipto, até aproximadamente 2,0 anos e foi realizado em regiões do estado de São Paulo. Já na pesquisa realizada por Galdino (2015) as condições foram semelhantes ao presente estudo, uma vez, que foi utilizado a mesma base de dados, porém, este último além de ter realizado a diagnose pelo DRIS considerou um número menor de nutrientes no diagnóstico, sendo eles N, P, K, Zn e B.

As FSU para as CRH e CRV obtidas neste estudo também apresentaram diferenças. Considerando as FSU obtidas pelo modelo polinomial de 2º grau, para a CRV os limites inferiores das faixas da classe suficiente foram menores para todos os nutrientes, exceto para Fe, Mn e G(x). Por outro lado, os limites superiores desta mesma classe foram maiores quando comparadas com as FSU para CRH, menos para Mg, S, Fe e B. Esses resultados indicam que a produtividade em volume dos povoamentos de eucalipto é mais prejudicada quando o nutriente é limitante por falta. Já para as FSU desta mesma classe obtidas pela RDLP os limites inferiores foram menores para o CRV para a maioria dos nutrientes, exceto para Fe e também para G(x). Resultado semelhante foi observado para os limites superiores os quais também foram menores, exceto para P, K e K.

Embora o CND seja vantajoso em relação ao DRIS, pois, leva em consideração a interação entre todos os nutrientes mais o fator de complemento e não apenas as relações duais entre os nutrientes sob diagnose e este fato pode levar a maior sensibilidade nos diagnósticos, as FSU

obtidas no presente estudo pelo CND, quando comparadas com as obtidas pelo DRIS na literatura, são menos precisas, devido as maiores amplitudes nos intervalos das suas faixas. Este fato, pode ser em decorrência da maior diversidade da base de dados utilizada.

Por outro lado, vale ressaltar que, a comparação foi realizada com o método diferente do CND, uma vez que, propostas de FSU pelo CND para plantios de eucalipto ainda são incipientes. Considerando que o relacionamento entre o crescimento relativo e os índices CND apresenta uma região de crescimento máximo constante mesmo variando o nutriente, as FSU obtidas utilizando as equações ajustadas pela RDLP teve as suas amplitudes de faixas aumentadas, principalmente para a classe suficiente, para a maioria dos nutrientes e também para  $G(x)$ . Este resultado indica que, para o CND o aumento da amplitude das faixas de suficiência não está relacionado necessariamente a menor precisão do diagnóstico e sim que, para este método as FSU obtidas são realmente mais amplas, demonstrando que o CND é um método mais sensível para representar a relação entre produção e as diferentes interações edafoclimáticas observadas no campo

#### **4.7. Diagnósticos dos plantios de eucalipto com base nas faixas de suficiência**

Obtidas as FSU pelo CND, estimadas pela equação ajustada pelo modelo polinomial de 2º, foi realizado a diagnose nutricional dos plantios de eucalipto considerando as classes limitante por falta ( $CR < 90\%$ ), Suficiente ( $90\% \leq CR < 100\%$ ), Alta ( $100\% \leq CR < 90\%$  a direita) e limitante excesso ( $CR \leq 90\%$  a direita) (Tabela 19). Nesta diagnose, verifica-se que grande parte dos talhões encontra-se na classe normal (suficiente + alta) ao avaliar  $G(x)$  e todos os nutrientes tanto para o CRH quanto para o CRV. Resultado diferente do verificado pelo potencial de resposta à adubação, que classificou o Cu como o nutriente mais limitante por falta em 47% dos talhões e os nutrientes Zn, K, N e P os mais limitantes por excesso em 44%, 42%, 39% e 35% dos talhões, respectivamente.

Tabela 19: Frequência de talhões (%) em cada classe de diagnósticos das faixas de suficiência obtidas pelos Índices CND, pelo método da fronteira, com equações ajustadas pelo modelo polinomial de 2º grau para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B.

| Classes <sup>1</sup>  | G(X)          | N    | P    | K    | Ca   | Mg   | S    | Cu   | Fe   | Zn   | Mn   | B    |
|-----------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                       | -----CRH----- |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Limitante por falta   | 0,3           | 0,4  | 1,3  | 0,8  | 0,2  | 2,7  | 0,4  | 3,4  | 1,0  | 3,0  | 7,0  | 0,2  |
| Suficiente            | 48,2          | 48,7 | 38,4 | 44,0 | 55,2 | 70,1 | 72,0 | 37,0 | 74,3 | 36,9 | 43,4 | 21,8 |
| Alta                  | 50,7          | 50,1 | 53,2 | 54,6 | 43,7 | 27,2 | 22,9 | 59,5 | 23,4 | 55,6 | 44,0 | 72,6 |
| Limitante por excesso | 0,8           | 0,8  | 7,1  | 0,6  | 0,9  | 0,0  | 4,7  | 0,0  | 1,3  | 4,4  | 5,6  | 5,4  |
| ICL_A <sup>2</sup>    | 51,2          | 50,7 | 58,1 | 55,4 | 44,2 | 28,0 | 24,1 | 61,7 | 23,9 | 60,1 | 50,4 | 76,9 |
|                       | -----CRV----- |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Limitante por falta   | 0,1           | 4,9  | 4,5  | 10,7 | 6,4  | 5,5  | 2,8  | 12,1 | 0,2  | 9,0  | 1,6  | 0,8  |
| Suficiente            | 19,4          | 57,0 | 35,6 | 59,8 | 55,2 | 46,5 | 19,8 | 27,5 | 48,5 | 38,9 | 32,7 | 39,1 |
| Alta                  | 70,1          | 37,2 | 43,2 | 29,2 | 34,5 | 46,8 | 52,8 | 57,5 | 45,5 | 46,3 | 55,4 | 58,0 |
| Limitante por excesso | 10,4          | 0,8  | 16,7 | 0,3  | 4,0  | 1,2  | 24,5 | 2,9  | 5,8  | 5,7  | 10,2 | 2,1  |
| ICL_A <sup>2</sup>    | 78,3          | 39,5 | 54,8 | 32,8 | 38,5 | 50,2 | 72,7 | 67,7 | 48,4 | 54,3 | 62,9 | 59,7 |

<sup>1</sup>Limitante por falta (CR < 90 %), Suficiente (90 ≤ CR < 100%), Alta (100 % ≤ CR < 90% a direita), limitante por excesso (CR ≤ 90 % a direita), CRH = Crescimento relativo em altura, CRV = Crescimento relativo em volume.  
<sup>2</sup>Índice de consumo de luxo: Alta / (Suficiente + Alta).

Na diagnose realizada pelas FSU, verifica-se uma baixa proporção de talhões com nutrientes limitando a produtividade por falta, em que, ao considerar o CRH a frequência para G(x) e para todos os nutrientes foi inferior a 10%, sendo a maior frequência igual a 7,0% (Mn). Já para o CRV a proporção de talhões classificados nesta classe foi inferior a 15%, com maior frequência igual a 12,1% (Cu). O mesmo foi observado para a classe limitante por excesso, onde a frequência de talhões obtidos nesta classe, também foi baixa, sendo menor que 10% e 25% para a CRH e CRV, respectivamente. Considerando o CRH o nutriente mais limitante por excesso foi o P (7,1%), seguido do Mn (5,6%) e B (5,4%) e, para o CRV foi S (24,5%), seguido do P (16,7%) e Mn (10,2%). A maior proporção de talhões na classe normal (suficiente + alta) é devido a flexibilidade das FSU, que, quando estabelecidas com intervalos mais amplos, como as obtidas no presente estudo, aumenta a probabilidade de se obter o teor ou índice de equilíbrio nutricional da amostra dentro desta faixa.

Mesmo que a junção das classes suficiente + alta pode ser considerada como normal, verifica-se que para grande parte dos nutrientes a frequência dos talhões na classe alta é maior que na classe suficiente, exceto para Ca, Mg, S e Fe, quando considera o CRH e N, P, Ca e Fe, quando considera o CRV. A subdivisão da classe normal em suficiente + alta possibilita refinar a diagnose, uma vez que, identifica os talhões que possa estar ocorrendo um “consumo de luxo” do nutriente, o qual, é verificado na classe alta (LOCATELLI, 2009, FERNANDES, 2010, GALDINO, 2015). Nesse sentido, Galdino (2015) propõe dois índices de “consumo de luxo”, sendo que, o primeiro é dado pela própria frequência relativa dos talhões na classe Alta (%) e

um segundo pela razão entre a frequência de talhões na classe alta e o somatório das classes Suficiente e Alta (ICL\_A).

Considerando o primeiro índice, a sequência de nutrientes em regime nutricional de “consumo de luxo” para o CRH é  $B > Cu > Zn > K > P > N > Mn > Ca > Mg > Fe > S$  e para o CRV é  $B > Cu > Mn > S > Mg > Zn > Fe > P > N > Ca > K$ . Já para o índice ICL\_A a sequência de consumo de luxo considerando o CRH é dada por  $B > Cu > Zn > P > K > N > Mn > Ca > Mg > S > Fe$  e para o CRV é dada por  $S > Cu > Mn > B > P > Zn > Mg > Fe > N > Ca > K$ . Verifica-se que para o CRH as sequências dadas pelo primeiro e segundo índice são semelhantes, diferenciando a ordem apenas do P e K, e S e Fe. Por outro lado, para o CRV a sequência dos nutrientes em consumo de luxo dada por ambos os índices é diferente. Galdino (2015) ao realizar a diagnose nutricional dos mesmos plantios de eucaliptos compreendidos no presente estudo, também obteve a sequência de consumo de luxo utilizando o índice da classe alta e o ICL\_A, porém, estes, foram provenientes das FSU obtidas pelo DRIS, considerando o crescimento relativo em volume. A sequência obtida pela autora foi:  $K < B < N < Zn < P$  (índice classe alta) e  $K < B < N < Zn < P$  (índice ICL\_A).

A partir desses resultados, fica evidente que, embora a maioria dos talhões sejam classificados na classe normal, alguns desequilíbrios nutricionais sejam por falta ou excesso ainda são verificados, sendo estes, na proporção de 1,2% (N), 8,4% (P), 1,4% (K), 1,1% (Ca), 2,7% (Mg), 5,1% (S), 3,4% (Cu), 2,3% (Fe), 7,4% (Zn), 12,6% (Mn), 5,6% (B) para o CRH e 5,7% (N), 21,2% (P), 11% (K), 10,4% (Ca), 6,7% (Mg), 27,3% (S), 15% (Cu), 6,0% (Fe), 14,7% (Zn), 11,8% (Mn), 2,9% (B) para o CRV.

Como já mencionado, a diagnose nutricional realizada pelo CND avalia tanto o grau de equilíbrio quanto o grau de balanço nutricional, sendo este último diagnosticado por  $G(x)$ . Se com os resultados obtidos é possível verificar alguns desequilíbrios nutricionais, o mesmo é observado ao avaliar o grau de balanço. Para  $G(x)$ , maior frequência de talhões também foi observada na classe normal, porém, mesmo com este resultado, 1,0% e 11% dos talhões encontram-se desbalanceados nutricionalmente para o CRH e o CRV, respectivamente.

Essas diferenças nos resultados entre CRH e CRV pode ser explicada pelo fato da segunda levar em consideração para o seu cálculo além da variável altura o *dap*. Sabe-se que o *dap* é fortemente influenciado pela competição e conseqüentemente pelos fatores de crescimento, repercutindo na produtividade em volume e fazendo com que este seja mais sensível as variações dos fatores de crescimento, em especial, aos nutrientes. Outra explicação para tais diferenças, pode estar relacionado ao número de dados utilizados ao considerar o volume, uma

vez que, utilizou-se apenas as árvores que tiveram o seu *dap* mensurado. Isso foi necessário devido a presença de árvores muito jovens, onde o *dap* não é usualmente mensurado.

A diagnose nutricional dos plantios de eucalipto por meio de FSU também foi realizada para aquelas obtidas pelas equações ajustadas pela RDLP, considerando as mesmas classes: limitante por falta ( $CR < 90\%$ ), Suficiente ( $90\% \leq CR < 100\%$ ), Alta ( $100\% \leq CR < 90\%$  a direita) e limitante excesso ( $CR \leq 90\%$  a direita) (Tabela 20). Assim como na diagnose realizada pelas FSU obtidas pelas equações ajustadas pelo modelo polinomial de 2º grau, observa-se que a maioria dos talhões encontra-se na classe normal (suficiente + alta) para G(x) e para todos os nutrientes tanto para o CRH quanto para o CRV.

Tabela 20: Frequência de talhões (%) em cada classe de diagnósticos das faixas de suficiência obtidas pelos Índices CND, pelo método da fronteira, com equações ajustadas pela regressão duplo linear com resposta platô para G(x), N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B.

| Classes <sup>1</sup>  | G(X)          | N    | P    | K    | Ca   | Mg   | S    | Cu   | Fe   | Zn   | Mn   | B    |
|-----------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                       | -----CRH----- |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Limitante por falta   | 1,0           | 0,4  | 1,8  | 0,6  | 0,3  | 2,4  | 0,4  | 6,3  | 0,7  | 2,7  | 0,2  | 0,2  |
| Suficiente            | 87,7          | 95,8 | 76,4 | 3,9  | 93,2 | 8,9  | 69,8 | 9,8  | 5,8  | 89,5 | 94,9 | 0,8  |
| Alta                  | 9,7           | 3,2  | 14,6 | 95,1 | 5,5  | 88,7 | 25,5 | 83,8 | 93,4 | 5,9  | 4,2  | 98,7 |
| Limitante por excesso | 1,6           | 0,6  | 7,1  | 0,4  | 1,0  | 0,0  | 4,2  | 0,1  | 0,1  | 1,9  | 0,7  | 0,3  |
| ICL_A <sup>2</sup>    | 10,0          | 3,2  | 16,0 | 96,0 | 5,6  | 90,9 | 26,8 | 89,5 | 94,1 | 6,2  | 4,2  | 99,2 |
|                       | -----CRV----- |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Limitante por falta   | 0,0           | 2,6  | 4,2  | 3,6  | 2,4  | 4,4  | 1,2  | 10,6 | 0,2  | 5,5  | 0,5  | 0,6  |
| Suficiente            | 83,1          | 94,7 | 79,7 | 92,3 | 5,6  | 6,0  | 64,4 | 88,0 | 0,5  | 5,0  | 0,8  | 7,3  |
| Alta                  | 9,8           | 2,0  | 7,5  | 4,0  | 90,4 | 88,6 | 16,6 | 0,8  | 95,0 | 85,0 | 92,2 | 91,5 |
| Limitante por excesso | 7,1           | 0,6  | 8,7  | 0,1  | 1,5  | 1,0  | 17,8 | 0,5  | 4,3  | 4,5  | 6,4  | 0,6  |
| ICL_A <sup>2</sup>    | 10,6          | 2,1  | 8,6  | 4,1  | 94,1 | 93,7 | 20,5 | 1,0  | 99,5 | 94,5 | 99,1 | 92,6 |

<sup>1</sup>Limitante por falta ( $CR < 90\%$ ), Suficiente ( $90 \leq CR < 100\%$ ), Alta ( $100\% \leq CR < 90\%$  a direita), limitante por excesso ( $CR \leq 90\%$  a direita), CRH = Crescimento relativo em altura, CRV = Crescimento relativo em volume.

<sup>2</sup>Índice de consumo de luxo: Alta / (Suficiente + Alta).

Nota-se a baixa frequência de talhões com nutrientes limitando a produtividade por falta, em que, ao considerar o CRH a frequência para G(x) e para todos os nutrientes foi inferior a 10%, sendo a maior frequência igual a 6,3% (Cu). Já para o CRV a proporção de talhões classificados nesta classe foi inferior a 12%, com maior frequência também obtida para o Cu (10,6%). O mesmo foi observado para a classe limitante por excesso, onde a frequência de talhões nesta classe, também foi baixa, sendo menor que 10% e 20% para o CRH e o CRV, respectivamente. No CRH o nutriente mais limitante por excesso foi o P (7,1%). Já no CRV foi o S (17,8%). Nesta diagnose, a frequência de talhões classificados como limitantes por falta ou excesso foi menor quando comparada com a diagnose realizada pelas FSU anteriores, o que já era esperado,

visto que, as FSU obtidas pelas equações ajustadas pela RDLP apresentaram maiores amplitudes.

O consumo de luxo também foi avaliado considerando as FSU obtidas pela RDLP, em que para o primeiro índice (a própria frequência na classe alta) a sequência para o CRH é dada por  $B > K > Fe > Mg > Cu > S > P > Zn > Ca > Mn > N$  e para CRV é  $Fe > Mn > B > Ca > Mg > Zn > S > P > K > N > Cu$ . Já para o índice ICL\_A a sequência de consumo de luxo para a CRH é dada por  $B > K > Fe > Mg > Cu > S > P > Zn > Ca > Mn > N$  e para CRV é dada por  $Fe > Mn > Zn > Ca > Mg > B > S > P > K > N > Cu$ .

A partir destas análises observa-se que as diagnoses realizadas pelas FSU obtidas pelas duas metodologias já mencionadas são semelhantes em relação a classificar grande parte dos talhões na classe normal (suficiente + alta). Por outro lado, a sequência de nutrientes que podem estar limitando o crescimento seja por falta ou excesso, ou até mesmo se eles estão em consumo de luxo se diferenciam entre as metodologias. Diante disso, devido ao melhor ajuste da RDLP aos dados, o uso das FSU obtidas por esta metodologia tende a ser mais adequado para a realização dos diagnósticos nutricionais pelo método CND.

## 5. CONCLUSÕES

O estabelecimento de normas CND utilizando a população de alta produtividade estabelecida pela linha de fronteira demonstrou ser apropriada para a maioria dos nutrientes.

Normas CND para macro e micronutriente foram geradas para plantios clonais de eucalipto, sendo estas precisas para a maioria dos nutrientes.

Os nutrientes foram ordenados quanto ao grau de limitação desde o mais deficiente ao mais excessivo.

As curvas de resposta potencial nutrientes específicas foram explicativas, sendo que aquelas obtidas pela regressão duplo linear com resposta platô se ajustaram melhor ao relacionamento entre os índices CND e o crescimento relativo em altura e em volume.

As faixas de suficiência obtidas para o CND são assimétricas quanto aos seus limites e apresentaram intervalos bem amplos.

As faixas de suficiência obtidas para o CND foram adequadas para avaliar o status nutricional dos povoamentos clonais de eucalipto demonstrando que a maioria dos talhões avaliados enquadraram-se na classe normal.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBES, C.; PARENTL, L. E.; KARAML, A.; LSFAN, D. Onion response to ammoniated peat and ammonium sulfate in relation to ammonium toxicity. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, p.261-272. 1995.

AITCHISON, J. The statistical analysis of compositional data. **Journal of the Statistical Sociaty**. United Kingdom, v. 44, n.2, p.139-177. 1992.

ALI, A. M. Nutrient sufficiency ranges in mango using boundary-line approach and compositional nutrient diagnosis norms in El-Salhiya, Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 2, p. 188–201, 2018.

ANJANEYULU, K.; RAGHUPATHI, H. B.; CHANDRAPRAKASH, M. K. Compositional nutrient diagnosis norms (CND) for guava (*Psidium guajava* L.). **Journal of Horticultural Science**, v.3, n. 2, p. 132-135, 2008.

BAHIA, B. L. **Curvas de resposta potencial e faixas de suficiência nutricional para o cacauero no sul da Bahia**. 2021. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2021.

BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de. Fertilidade de solos, nutrientes e produção florestal. **Revista Florestas Plantadas**, Visão Agrícola, n. 4, p. 76-79, 2005.

BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Nutrição mineral do eucalipto. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M. VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P (Eds). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**, Viçosa, MG: SIF, 2013. p. 187-208.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition, University of Natal. **Soil science**, 1973. (Bulletin, 1).

BEVERLY, R.B. Comparison of DRIS and alternative nutrient diagnostic methods for soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v.10, p. 901-920, 1987.

BHARGAVA, B. S.; RAGHUPATHI, H. B. Multivariate diagnosis of nutriente element norms for grape. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 219-227, 1999.

BLANCO-MACÍAS, F.; LARA-HERRERA, A.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; CORTÉS-BAÑUELOS, J. O.; LUNA-FLORES, M.; SALAS-LUEVANO, M. A. Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). **Revista Chapingo Serie Horticultura**, v. 12, n. 2, p. 165-175, 2006.

BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E.; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J. A.; MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, v.173, p.927–934, 2010.

BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E.; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J. A. Comparison between cnd norms and boundary-line approach nutrient standards: *Opuntia ficus-indica* L. case. *Revista Chapingo. Serie horticultura.*, v.15, n.2, p.217-223, 2009.

BORGES, J. S. **Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto**. 2012. 70f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

BRUNETTO, G.; RICACHENEVSKY, F. K.; STEFANELLO, L. O.; VAHL DE PAULA, B.; KULMANN, M. S. S.; TASSINARI, A.; MELO, G. W. B.; NATALE, W.; ROZANE, D. E.; CIOTTA, M. N.; BRIGHENTI, A. F.; COMIN, J. J.; LOURENZI, C. R.; LOSS, A.; SCHMITT, D. E.; ZALAMENA, J.; CONTI, L.; TIECHER, T. L.; SOUZA, A. L. K.; DE BEM, B. P. Diagnosis and management of nutriente constraints in grape. In: Srivastava, A.K.; Chengxiao, H (eds.) **Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints**. 2020, p. 693-710.

BUCHER, C. A.; BUCHER, C. P. C.; ARAÚJO, P. A.; SPERANDIO, M. V. L. Fósforo. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A (Eds). **Nutrição mineral de plantas**. 2 ed. Viçosa, MG: SBCS, 2018. p. 401-428.

CAIRES, E. F.; POLTRONIERI, R.; GUIMARÃES, A. M. Soybean seed analysis as a nutritional diagnostic tool. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 21, p. 2712-2725, 2020.

CALHEIROS, L. C. S.; FREIRE, F. J.; FILHO, G. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; MOURA, A. B.; COSTA, J. V. T.; CRUZ, F. J. R.; SANTOS, Á. S.; REZENDE, J. S. Assessment of nutrient balance in sugarcane using DRIS and CND methods. **Journal of Agricultural Science**; v. 10, n. 9, p. 164-179, 2018.

CAMACHO, M. A.; SILVEIRA, M. V.; CAMARGO, R. A.; NATALE, W. Faixas normais de nutrientes pelos métodos CHM, DRIS e CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranjeira-pera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p.193-200, 2012.

CAMPION, J. M.; SCHOLLES, M. C. Diagnosing foliar nutrient dynamics of *Eucalyptus grandis* in KwaZulu-Natal, South Africa, using optimal element ratios and the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Southern Hemisphere Forestry Journal**, v. 69, n. 3, p.137-150, 2007.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**, Viçosa, MG, SBCS, p. 376-470, 2007.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**, Viçosa, MG, SBCS, p. 769-850, 2007.

CRESTE, J. E. Perspectivas do DRIS em culturas de alta produtividade. In: PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; VALE, D. W.; CORREIA, M. A. R.; SOUZA, H. A. **Nutrição de plantas aplicada a sistemas de alta produtividade**. Jaboticabal: Capes/Fundunesp, p. 83-104, 2008.

CUNHA, A. C. M. C. M. **Diagnose nutricional de minicepas e previsão de enraizamento de miniestacas de eucalipto por redes neurais**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R.; CARMELLO, Q. A. C.; SANTOS, L. A.; SPERANDIO, M. V. L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A (Eds). **Nutrição mineral de plantas**. 2 ed. Viçosa, MG: SBCS, 2018. p. 491-562.

DEZORDI, L. R.; AQUINO, L. A.; AQUINO, R. F. B. A.; CLEMENTE, J. M.; ASSUNÇÃO, N. S. Diagnostic methods to assess the nutritional status of the carrot crop. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 01-16, 2016.

DIAS, J. R. M.; TUCCI, C. A. F.; WADT, P. G. S.; PARTELLI, F. L.; PEREZ, D. V.; ESPINDULA, M. C.; TOMIO, D. B. Antecipação do período de diagnose foliar em laranja 'pêra' no Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.48, n.7, p.757-764, 2013.

DIAS, J. R. M.; WADT, P. G. S.; PARTELLI, F. L.; ESPINDULA, M. C.; PEREZ, D. V.; SOUZA, F. R.; BERGAMIN, A. C.; DELARMELINDA, E. A. Normal nutrient ranges and nutritional monitoring of 'pêra' orange trees based on the CND method in different fruiting stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.52, n.9, p.776-785, 2017.

DOUCET, K. **Compositional nutrient diagnosis of forest trees in north western Quebec**. 1997. 56f. Dissertation (Master of Science in the Natural Resource Sciences) - Faculty of Graduate Studies and Research - McGill University, Canadá, 1997.

DUTRA, T. R. **Sessenta anos de fertilização do eucalipto no Brasil**. 2020. 140f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

EGOZCUE, J. J.; PAWLOWSKY-GLAHN, V.; MATEU-FIGUERAS, G.; BARCELÓ-VIDAL, C. Isometric logratio transformations for compositional data analysis. **Mathematical Geosciences**. v. 35, p. 279-300, 2003.

EL KADRI, T. C. **Diagnose da composição nutricional de tecido foliar e radicular do milho**. 2017. 38f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.

EVANYLO, G.K., SUMNER, M.E. Utilization of the Boundary Line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.18, p. 1379-1401, 1987.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. 2002. 76p. Dissertação (Curso de Pós-Graduação Lato Sensu, Especialização: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

FERNANDES, V. F. **Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto**. 2010. 83f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

FERRÁNDEZ-CÁMARA, M.; MARTÍNEZ-NICOLÁS, J. J.; ALFOSEA-SIMÓN, M.; CÁMARA-ZAPATA, J. M.; MORENO, P. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F. Estimation of diagnosis and recommendation integrated system (DRIS), compositional nutrient diagnosis (CND) and range of normality (RN) norms for mineral diagnosis of almonds trees in Spain. **Horticulturae**, v. 7, p. 01-12, 2021.

FERREIRA, I. E. P. **Modelos de regressão e curvas de produção vegetal: aplicações nas áreas de nutrição de plantas e adubação**. 2015. 133f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

FERREIRA, J. M. A.; STAPE, J. L. Productivity gains by fertilisation in Eucalyptus urophylla clonal plantations across gradients in site and stand conditions. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, South Africa, v. 71:4, p. 253-258, 2010.

GALDINO, M. P. **Valores de referência e faixas de suficiência nutricional para avaliação do estado nutricional da cultura do eucalipto no Brasil**. 2015. 59f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

GANESHAMURTHY, A. N.; GOVINDAKRISHNAN, P.; RAGHUPATHI, H. B.; MAHENDRA KUMAR, M. B. Compositional nutrient diagnosis (CND) norms and indices for potato (*Solanum tuberosum* L.). **Journal of Horticultural Science**, v. 14, n.2, p. 142-148, 2019.

GARBA, I. I.; JIBRIN, J. M.; KAMARA, A. Y.; ADNAN, A. A.; ABDULRAHMAN, B. L.; SHEHU, B. M.; ADAM, A. M. Assessment of nutrient imbalances in maize (*Zea mays* L.) using compositional nutrient diagnosis in Guinea Savanna of Nigeria. In 3rd International Conference on Drylands, 2018. Kano. **Proceedings...** Kano: Bayero University, 2018, p. 63-78.

GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; AVILA-SERRANO, N. Y.; MURILLO-AMADOR, B.; NIETO-GARIBAY, A.; MAGALLANES QUINTANAR, R.; LARRINAGA-MAYORAL, J.; TROYO-DIÉGUEZ, E. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) grown on desert calcareous soil. **Plant and Soil**, v. 271, p. 297–307, 2005.

GEIKLOOI, A.; REYHANITABAR, A.; NAJAFI, N. Critical indexes of compositional nutrient diagnosis (CND) and its validation in wheat Fields. **Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)**, v. 38, n.3, p.480-504, 2021.

GIMENEZ, M.; NIEVES, M.; GIMENO, H.; MARTÍNEZ, J.; MARTÍNEZ-NICOLÁS, J. J. Nutritional diagnosis norms for three olive tree cultivars in superhighdensity orchards. **International Journal of Agricultura and Natural Resources**, v. 48, n.1, p. 34-44, 2021.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008.

GONÇALVES, J. L.M.; ALVARES, C. A.; RIOYEI HIGA, A.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P. H. S, HUBNER, A.; BOUILLET, J.P.D.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.

GONÇALVES, J.L.M. **Fertilização de plantação de eucalipto**. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 2. Campinas, São Paulo, Brasil. Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, p. 85–113, 2011.

GOTT, R. M.; AQUINO, L. A.; CLEMENTE, J. M.; SANTOS, L. P. D.; CARVALHO, A. M. X.; XAVIER, F. O. Foliar diagnosis indexes for corn by the methods diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) and nutritional composition (CND). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 01-33, 2017.

GUIMARÃES, F. C. N.; SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; ENSINAS, S. C.; ALTOMAR, P. H.; CONRAD, V. A.; POTRICH, D. C.; ROSA, C. B. C. J.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, F. A. Nutrients optimum range (NOR) based on DRIS method to assess the nutritional status of the first ratoon sugarcane. **Australian Journal Crop Science**, v.9, n.7, p.638-645, 2015.

GUIMARÃES, G. G. F.; DEUS, J. A. L. Diagnosis of soil fertility and banana crop nutrition in the state of Santa Catarina. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v. 43, n. 4, p. 01-12, 2021.

HALLMARK, W. B.; BEVERLY, R. B.; SUMNER, M. E.; MOOY, C. J. de; MORRIS, H. F.; PESEK, J.; FONTENOT, J. D. Soybean phosphorus and potassium requirement evaluation by three M-DRIS data bases. **Agronomy Journal**, v.82, p.323-328, 1990.

HERNANDES, A. **Diagnose nutricional da goiabeira**. 2012. 111f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

HERNANDES, A.; ROZANE, D. E.; SOUZA, H. A.; ROMUALDO, L. M.; NATALE, W. Amostragem para diagnose do estado nutricional e avaliação da fertilidade do solo em caramboleiras. **Bragantia**. Campinas, v. 70, n. 3, p. 657-663, 2011.

HOLLAND, D.A. The interpretation of leaf analysis. J. **Horticultural Science**, v. 41, p. 311-329, 1966.

IBÁ - INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2021**, ano base 2020. Brasília, 2021. 178p.

JESUS, M. V. **Determinação da folha diagnóstico e avaliação do estado nutricional de canola (*Brassica napus* L.)**. 2017. 44f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.

KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, A. N. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 802–808, 2001a.

KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. **Agronomy Journal**. v. 93, p. 809–814, 2001b.

KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. The phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. **Agronomy Journal**. v. 93, p.815–819, 2001c.

KUMAR, P.S. S.; GEETHA, S. A.; SAVITHRI, P.; MAHENDRAN, P.P.; RAGUNATH, K. P. Evaluation of DRIS and CND indexes for effective nutriente management in Muscat grapevines (*Vitis vinefera*). **Journal of Applied. Horticulture**, v.5, n.2, p. 76-80, 2003.

KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose do seu estado nutricional**. 2004. 101f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

LEITE, P. B.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; GUARÇONI M, A.; JÚNIOR, L. A. Z. Níveis críticos de fósforo, para eucalipto, em casa de vegetação, em função da sua localização no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1311-1322, 2009.

LOCATELLI, M. V. **Diagnose nutricional de lavouras de soja da região de Campo Novo dos Parecis, Mato Grosso**. 2009. 50f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

LOPES, B. G.; FARIA, G. A.; MALTONI, K. L.; ROCHA, P. S.; PEIXOTO, A. P. B.; OLIVEIRA, T. A.; FONSECA, A. D.; FELIZARDO, L. M. Classification of the coefficient of variation for experiments with eucalyptus seedlings in greenhouse. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 52, n. 4, p. 01-14, 2021.

MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; OLIVARES-SÁENZ, E.; PÉREZ-VEYNA, O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; MARTÍNEZ, J. D. L. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, n. 11, p. 2019-2033, 2006.

MASSAD, M. D. **Dinâmica nutricional e fertilização de povoamentos de eucalipto**. 2020. 135f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020.

MATOS, G. S. B.; FERNANDES, A. R.; WADT, P. G. S. Níveis críticos e faixas de suficiência de nutrientes derivados de avaliação do estado nutricional da palma-de-óleo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1557-1567, 2016.

MENDONÇA, L. P. **Curvas de resposta potencial e faixas de suficiência nutricional para café arábica em minas gerais**. 2016. 56f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

MENESES, N. B. **Diagnóstico do estado nutricional do milho-doce**. 2017. 87f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

MODESTO, V. C.; PARENT, S. E.; NATALE, W.; PARENT, L. E. Foliar Nutrient balance standards for Maize (*Zea mays* L.) at high-yield level. **American Journal of Plant Sciences**, n. 5, p. 497-507, 2014.

MORAIS, T. C. B.; PRADO, R. M.; TRASPADINI, E. I. F.; WADT, P. G. S.; PAULA, R. C.; ROCHA, A. M. S. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus spp.* rooted cuttings. **Forests**, v. 10, p. 01-18, 2019.

MOSTASHARI, M.; VINEJAD, A. K.; GOLMOHAMMADI, M. Comparative study of DOP and CND methods for leaf nutritional diagnosis of *Vitis vinifera* in Iran. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 01-09, 2018.

NASCIMENTO, A. F. J. **Diagnose nutricional de plantios jovens de eucalipto pelo método DRIS**. 2014. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2014.

NETO, A. E. F.; BARROS, N. F.; GODOY, M. F.; NOVAIS, R. F. Eficiência nutricional de mudas de *Eucalyptus* em relação ao fósforo. **Revista Árvore**, v. 20, n.1, p. 17-28, 1996.

NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, R. A.; ALVAREZ, V., V. H.; SILVA, I. R. Monitoramento Nutricional e Recomendação de Adubação. In: **Encontro Brasileiro de Silvicultura**, 2008, Curitiba. Encontro Brasileiro de Silvicultura, v. 1, p. 51-60, 2008.

NOVAIS, R. F.; JOT SMYTH, T.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**, Viçosa, MG, SBCS, p. 471-550, 2007.

NOWAKI, R. H. D. **Padrões para avaliação do estado nutricional do tomateiro para indústria**. 2017. 122f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

NOWAKI, R. H. D.; PARENT, S. É.; FILHO, A. B. C.; ROZANE, D. E.; MENESES, N. B.; SILVA, J. A. S.; NATALE, W.; PARENT, L. E. Phosphorus over-fertilization and nutrient misbalance of irrigated tomato crops in Brazil. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 01-11, 2017.

OLIVEIRA, A. P. **Índice “S” e suas relações com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto**. 2010. 50f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

OLIVEIRA, C. T.; ROZANE, D. E.; AMORIM, D. A.; SOUZA, H. A.; FERNANDES, B. S.; NATALE, W. Diagnosis of the nutritional status of ‘paluma’ guava trees using leaf and flower analysis. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v. 42., n.3, 42, n. 3, p. 01-09, 2020.

PARENT, L. É. Diagnosis of the nutrient compositional space of fruit crops. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v. 33, n. 1, p. 321-334, 2011.

PARENT, L. E., KARAM, A., VISSER, S. A. Compositional nutrient diagnosis of the greenhouse tomato. **Hortscience**. Alexandria, v. 28, n. 10, p. 1041-1042. 1993.

- PARENT, L. E.; CAMBOURIS, A. N.; MUHAWENIMANA, A. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. **Soil Science Society of American Journal**. v. 58, p1432-1438, 1994a.
- 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.
- PARENT, L. E.; KHIARI, L. The compositional nutrient diagnosis of onions. **Acta Horticulturae**, p. 251-258, 2003.
- PARENT, L. E.; NATALE, W. CND: vantagens e benefícios para culturas de alta produtividade. In: PRADO, R. M.; ROZANE, D. E.; VALE, D. W.; CORREIA, M. A. R.; SOUZA, H. A. (Eds.). **Nutrição de plantas: diagnose foliar em grandes culturas**. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista, 2008. p. 105-114.
- PARENT, L. E.; NATALE, W.; ZIADI, N. Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. **Canadian Journal of Soil Science**, p. 383-390, 2009.
- PARENT, L. E.; POIRIER, M.; ASSELIN, M. Multinutrient diagnosis of nitrogen status in plants. **Journal of Plant Nutrition**. v. 18, n. 5, p.1013-1025, 1995.
- PARENT, L.E.; ISFAN, D.; TREMBLAY, N.; KARAM, A. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. **Journal of the American Society for Horticultural Science**. v. 119, n. 3, p. 420–426, 1994b.
- PARENT, S. E.; PARENT, L.; ROZANE, D. E.; NATALE, W. Plant ionome diagnosis using sound balances: case study with mango (*Mangifera Indica*). **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p. 01-12, 2013.
- PARTELLI, F. L.; DIAS, J. R. M.; VIEIRA, H. D.; WADT, P. G. S.; JÚNIOR, E. P. Avaliação nutricional de feijoeiro irrigado pelos métodos CND, DRIS e faixas de suficiência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, p. 858-866, 2014.
- PAULA, B. V.; ARRUDA, W. S.; PARENT, L. E.; ARAUJO, E. F.; BRUNETTO, G. Nutrient diagnosis of *Eucalyptus* at the factor-specific level using machine learning and compositional methods. **Plants**, v. 9, p. 01-15, 2020.
- POLITI, L. S.; FLORES, R. A.; SILVA, J. A. S.; WADT, P. G. S.; PINTO, P. A. C.; PRADO, R. M. Estado nutricional de mangueiras determinado pelos métodos DRIS e CND. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.17, n.1, p.11–18, 2013.
- PULITO, A. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SMETHURST, P. J.; JUNIOR, J. C. A.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J.H. T.; HÜBNER, A.; MORAES, L. F.; MIRANDA, A. C.; KAMOGAWA, M. Y.; GAVA, J. L.; CHAVES, R.; SILVA, C. R. Available Nitrogen and Responses to Nitrogen Fertilizer in Brazilian Eucalypt Plantations on Soils of Contrasting Texture. **Forests**, v. 6, p. 973-991,2015.

RAGHUPATHI, H. B.; REDDY, B. M. C.; SRINIVAS, K. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in banana. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, p. 2131-2143, 2002.

ROCHA, J. B. O. **Diagnose nutricional de plantios jovens de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo e Sul da Bahia**. 2008. 56f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ROCHA, J. E. C. **Estado nutricional e adubação em plantios de *Eucalyptus brassiana* S.T. Blake X *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na amazônia oriental**. 2020. 160f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Rural da Amazônia, Belém, 2020.

RODRIGUES FILHO, V. A.; NEVES, J. C. L.; DONATO, S. L. R.; GUIMARÃES, B. V. C. Universality of Kenworthy and DRIS norms for prata and cavendish bananas grown in two environments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. 01-14, 2021.

RODRIGUES, F. A. V.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F. Disponibilidade de zinco para mudas de eucalipto em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3126, p. 49-1257, 2012.

ROZANE, D. E.; NATALE, W.; PARENT, L. E.; PARENT, S. E.; SOUZA, H. A.; AMORIM, D. A. População de referência no diagnóstico da composição nutricional (CND) em mangueiras. In: **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2013, Florianópolis, jul. de 2013, p. 01-03.

ROZANE, D. E.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; BARBOSA, J. C. J. C. Amostragem para diagnose do estado nutricional de mangueiras. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal, v. 29, n. 2, p. 371-376, 2007.

ROZANE, D. E.; NATALE, W.; PRADO, R. M.; BARBOSA, J. C. Tamanho da amostra foliar para avaliação do estado nutricional de goiabeiras com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.13, n.3, p.233-239, 2009.

ROZANE, D. E.; VAHL DE PAULA, B.; MELO, G. W. B.; SANTOS, E. M. H.; TRENTIN, E.; MARCHEZAN, C.; SILVA, L. O. S.; TASSINARI, A.; DOTTO, L.; OLIVEIRA, F. N.; NATALE, W.; BALDI, E.; TOSELLI, M.; BRUNETTO, G. Compositional nutrient diagnosis (CND) applied to grapevines grown in subtropical climate region. **Horticulturae**, v. 6, n. 56, p. 01-13, 2020.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M. VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P (Eds). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**, Viçosa, MG: SIF, 2013. p. 161-186.

SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; LAVRES JUNIOR, J.; CAMACHO, M. A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p.1651-1658, 2013.

SCHALER, K.; LOHNERTZ, O.; MICHEL, H. Improvements of the DRIS-system and first experiences in grapevine nutrition with special consideration of the compositional nutrient diagnosis approach. **Acta Horticulturae**, v. 383, p. 171-189, 1995.

SCHALLER, K.; LÖHNERTZ, O.; MICHEL, H. Modified Dris-system for leaf analysis to optimise fertilizer inputs –further developments with grapevines. **Acta Horticulturae**, v. 594, p. 369-375, 2002.

SCHLEPPI, P.; TOBLER, L.; BUCHER, J. B.; WYTTENBACH, A. Multivariate interpretation of the foliar chemical composition of Norway spruce (*Picea abies*). **Plant and Soil**, v. 219, p. 251–262, 2000.

SCHMIDT, R. **Amostragem foliar na floração para avaliação nutricional de cafeeiros clonais**. 2015. 44f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2015.

SCHNUG, E.; HEYM, J.; ACHWAN, F. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (bolides). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, p. 2739-2748, 1996.

SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; CAMACHO, M. A. Desenvolvimento de normas DRIS e CND e avaliação do estado nutricional da cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p. 97-104, 2010a.

SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; CAMACHO, M. A. Determinação de faixas normais de nutrientes no algodoeiro pelos métodos CHM, CND e DRIS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 34, p. 105-113, 2010b.

SGARBI, F. **Produtividade do Eucalyptus sp. em função do estado nutricional e da fertilidade do solo em diferentes regiões do estado de São Paulo**. 2002. 114f. Dissertação (Mestre em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, F. D. S.; SILVA, N. O.; OLIVEIRA, T. F.; REIS, M. R.; AQUINO, L. A. Foliar indices for carrot crop using the compositional nutrient diagnosis method. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 4, p. 399-407, 2017.

SILVA, G. G. C. **Diagnose nutricional do eucalipto pelo DRIS, M-DRIS e CND**. 2001. 132f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

SILVA, G. G. C.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ V., V. H.; LEITE, F. P. Nutritional diagnosis for eucalypt by DRIS, M-DRIS, and CND. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.5, p.507-515. 2004.

SILVA, G. G. C.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ V., V. H.; LEITE, F. P. Avaliação da universalidade das normas DRIS, M-DRIS E CND. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 755-761, 2005.

SILVA, G. P.; CHIAIA, H. L. J. Limitation due to nutritional deficiency and excess in sugarcane using the integral diagnosis and recommendation System (DRIS) and nutritional composition diagnosis (CND). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 01-10, 2021.

SILVA, G. P.; PRADO, R. M.; WADT, P. G. S.; MODA, L. R.; CAIONE, G. Accuracy of nutritional diagnostics for phosphorus considering five standards by the method of diagnosing nutritional composition in sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, p. 01-13, 2020.

SILVA, L. G.; SANTANA, R. C.; GOMES, F. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; FREITAS, G. C. Fertilization of eucalyptus stands at advanced ages in Minas Gerais, Brazil. **Floram**, v. 26, p. 01-11, 2019.

SILVA, L. G.; SANTANA, R. C.; OLIVEIRA, M. L. R.; GOMES, F. S. Evaluation of different silvicultural management techniques and water seasonality on yield of eucalyptus stands. **Scientia Agricola**, v. 79, n. 2, p. 01-11, 2022.

SILVA, L.; FREIRE, F. J.; FILHO, G. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MOURA, A. B.; COSTA, J. V. T.; REZENDE, J. S. Nutrient balance in sugarcane in Brazil: diagnosis, use and application in modern agriculture. **Journal of Plant Nutrition**, p. 01-23; 2021.

SILVA, R. M. L.; EIJI HAKAMADA, R.; BAZANI, J. H.; OTTO, M. S. G.; STAPE, J. L. Fertilization response, light use, and growth efficiency in Eucalyptus plantations across Soil and climate gradients in Brazil. **Forests**, v. 7, p. 117, 2016.

STAHL, J.; ERNANI, P. R.; GATIBONI, L. C.; CHAVES, D. M.; NEVES, C. U. Produção de massa seca e eficiência nutricional de clones de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* em função da adição de doses de fósforo ao solo. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 287-295, 2013.

STATSOFT. Statistica – data analysis software system. Version 10.0 [online]. Palo Alto: Statsoft Inc; 2010 [cited 2017 Apr 25]. Available from: [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

TOMÉ JUNIOR, J. B. **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação**. 2004. 141p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

TRASPADINI, E. I. F. **Acurácia do diagnóstico nutricional do nitrogênio, fósforo e boro para algodoeiro**. 2019. 40f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2019.

TREMBLAY, N.; AUCLAIR, P.; PARENT, L. E.; GOSSELIN. A multivariate diagnosis approach applied to celery. **Plant and Soil**. v. 154, p. 39-43, 1993.

URANO, E. O. M.; KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E. Avaliação do estado nutricional da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.41, n.9, p.1421-1428, 2006.

URANO, E. O. M.; KURIHARA, C. H.; MAEDA, S.; VITORINO, A. C. T.; GONÇALVES, M. C.; MARCHETTI, M. E. Determinação de teores ótimos de nutrientes em soja pelos métodos chance matemática, sistema integrado de diagnose e recomendação e diagnose da composição nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 63-72, 2007.

VAN DEN BOOGAART, K.G.; TOLOSANA-DELGADO, R., BREN, M. Compositions': Compositional Data Analysis in R Package. Disponível em: <http://cran.r-project.org/package=compositions>. 2003.

VIEIRA, S. **Análise de variância: ANOVA**. São Paulo, Atlas. 2006, 204p.

VINHA, A. P. C.; CARRARA, B. H.; SOUZA, E. F. S.; SANTOS, J. A. F.; ARANTES, S. A. C. M. Adsorção de fósforo em solos de regiões tropicais. **Nativa**, v. 9, n. 1, p. 30-35, 2021.

WADT, P. G. S. Diagnose Foliar e Recomendação de Adubação para Lavouras Comerciais. Rio Branco, AC: **Embrapa Acre**, 2011.

WADT, P. G. S. Nutritional status of *Eucalyptus grandis* clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 28, n. 1, p.15-20, 2004.

WADT, P. G. S. **Os métodos da chance matemática e do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. 1996. 123f. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

WADT, P. G. S.; DIAS, J. R. M. Normas DRIS regionais e inter-regionais na avaliação nutricional de café conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.6, p.822-830, Brasília, 2012.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, P. G. S.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.10, p.1797-1803, 1999.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Três métodos de cálculo do dris para avaliar o potencial de resposta à adubação de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 661-666, 1998a.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos dris e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 685-692, 1998b.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Advances in Soil Science**.v.6, p.149-188, 1987.

WEBB, R.A. Use of the Boundary Line in the analysis of biological data. **Journal of Horticultural Science**, v.47, p:309-319, 1972.

YOUSUF, M. N.; AKTER, S.; HAQUE, M. I.; MOHAMMAD, N.; ZAMAN, M. S. Compositional nutrient diagnosis (CND) of onion (*Allium cepa* L.). *Bangladesh Journal Agricultural Researc*

