

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCELA GUEDES DOURADO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE *Eucalyptus*
sp. NA REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ**

DOIS VIZINHOS

2021

MARCELA GUEDES DOURADO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE *Eucalyptus*
sp. NA REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ**

**Soil chemical attributes, nutrition and growth of *Eucalyptus* sp. in the Southwest
region of Paraná**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Dois Vizinhos, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias - Área de Concentração: Agroecossistemas.
Orientador: Eleandro José Brun
Coorientador: Carlos Alberto Casali

DOIS VIZINHOS

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Dois Vizinhos**



MARCELA GUEDES DOURADO

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE EUCALYPTUS SP. NA REGIÃO
SUDOESTE DO PARANÁ**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestra Em Ciências Agrárias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Agroecossistemas.

Data de aprovação: 30 de Novembro de 2021

Prof Eleandro Jose Brun, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Evandro Alcir Meyer, Doutorado - Universidade Federal de Santa Maria (Ufsm)

Prof Laercio Ricardo Sartor, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/12/2021.

Dedico à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por iluminar meus pensamentos, ouvir minhas preces e me conduzir.

Aos meus pais, por acreditarem no meu progresso profissional e por toda a contribuição e carinho dedicado a mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eleandro Brun, por todo o conhecimento repassado, sugestões e pelo incentivo.

Ao professor Carlos Alberto Casali, pela coorientação.

Ao professor Solon Jonas Longhi, pela contribuição nas análises estatísticas multivariadas.

Ao Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Dois Vizinhos, pela oportunidade de realização do mestrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), através do EDITAL Nº 02/2019 - DIRPPG-DV da Bolsa-Técnico para os Laboratórios de Pesquisa e Unidades de Ensino e Pesquisa da UTFPR-DV.

Agradeço aos silvicultores da região que permitiram acesso às suas áreas de plantios florestais para obtenção de dados para este estudo.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O setor florestal vem se expandindo a cada ano e, com este crescimento, aumentam as exigências de mercado em produtos florestais de qualidade, bem como a adoção de práticas de manejo ambientalmente saudáveis, que assegurem a sustentabilidade da produção florestal. O estado do Paraná tem expressiva contribuição no setor florestal, com 1,01 milhões de hectares com plantios florestais, em que cerca de 255.844 hectares correspondem ao gênero *Eucalyptus*, representando 25,4% de sua área plantada. Para alcançar alta produtividade florestal, o material genético utilizado e as condições nutricionais das plantas são componentes importantes relacionados à produção de madeira. Sendo assim, faz-se necessário avaliar a relação da fertilidade química do solo, com o desempenho *Eucalyptus* sp. e os teores de nutrientes no tecido foliar, com isso identificar quais solos são mais pobres e limitam o desenvolvimento das plantas. Diante disso, o objetivo do estudo foi avaliar a relação dos atributos químicos do solo com a nutrição e crescimento de *Eucalyptus* sp. no Sudoeste do Paraná. O estudo foi desenvolvido junto a silvicultores da região, em cinco áreas localizadas nos municípios de Cruzeiro do Iguaçu, Dois Vizinhos, Marmeleiro, Nova Esperança do Sudoeste e Salto do Lontra, que tem como principal cultura o eucalipto, para produção de cavacos de madeira (biomassa energética), que são destinados à indústria alimentícia para geração de vapor em caldeiras. Os indicadores do solo que mais se destacaram nas áreas foram MOS, V%, P, K, Ca e Mg. O P, Mg e pH do solo foram as variáveis que mais correlacionaram com o N, K, Ca, Na e Al, contidos nas folhas do eucalipto. As variáveis DAP, HT, HDOM e Vcc (m³ ha⁻¹) foram as que mais se correlacionaram com o P, K, Ca, Mg, MOS, pH, CTC, V%, Fe e Cu do solo e com B, Fe e Zn contidos nas folhas do eucalipto. Os atributos químicos do solo que mais influenciaram na ACP foram o P, MOS, pH e V%, sendo os atributos que mais caracterizam a fertilidade dos solos das áreas 1, 2 e 3. Os atributos químicos dos solos que mais contribuíram na análise discriminante nas três áreas, foram CTC, pH, V(%), Cu, Fe e B. Na análise CCA entre as variáveis do solo e foliar na área 1, com solos ricos em MO e Fe, e na área 2 com solos ricos em P, Cu, K, V(%) e pH, não mostraram relação com os nutrientes foliares do eucalipto.

Palavras-chave: Fertilidade Química do Solo; Análise Multivariada; Plantios Florestais.

ABSTRACT

The forestry sector has been expanding every year and, with this growth, market demands for quality forest products increase, as well as the adoption of environmentally sound management practices that ensure the sustainability of forest production. The state of Paraná has an expressive contribution to the forestry sector, with 1.01 million hectares with forest plantations, of which about 255,844 hectares correspond to the Eucalyptus genus, representing 25.4% of its planted area. To achieve high forest productivity, the genetic material used and the nutritional conditions of the plants are important components related to wood production. Therefore, it is necessary to evaluate the relationship between soil chemical fertility and Eucalyptus sp. and the nutrient contents in the leaf tissue, thus identifying which soils are poorer and limit plant development. Therefore, the objective of the study was to evaluate the relationship of soil chemical attributes with the nutrition and growth of Eucalyptus sp. in Southwest Paraná. The study was carried out with foresters in the region, in five areas located in the municipalities of Cruzeiro do Iguaçu, Dois Vizinhos, Marmeleiro, Nova Esperança do Sudoeste and Salto do Lontra, whose main crop is eucalyptus, for the production of wood chips (energy biomass), which are intended for the food industry to generate steam in boilers. The soil indicators that stood out the most in the areas were MOS, V%, P, K, Ca and Mg. Soil P, Mg and pH were the variables that most correlated with N, K, Ca, Na and Al contained in eucalyptus leaves. The variables DAP, HT, HDOM and Vcc (m³ ha⁻¹) were the ones that most correlated with P, K, Ca, Mg, MOS, pH, CTC, V%, Fe and Cu of the soil and with B, Fe and Zn contained in eucalyptus leaves. The soil chemical attributes that most influenced PCA were P, MOS, pH and V%, being the attributes that most characterize soil fertility in areas 1, 2 and 3. The chemical attributes of soils that most contributed to the discriminant analysis in the three areas, they were CTC, pH, V(%), Cu, Fe and B. In the CCA analysis between the soil and foliar variables in area 1, with soils rich in MO and Fe, and in area 2 with soils rich in P, Cu, K, V(%) and pH showed no relationship with eucalyptus leaf nutrients.

Keywords: Soil Chemical Fertility; Multivariate Analysis; Plantations Forest.

LISTRA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de Classificação de Solos das áreas amostradas.....	24
Figura 2 - Ordenação das variáveis considerando os dois primeiros componentes principais	75
Figura 3 - Correlações das parcelas com as variáveis edáficas obtidas pelo método de escala ideal em duas dimensões	77
Figura 4 - Classificação dos talhões avaliados em suas respectivas áreas, com seus centroides	80
Figura 5 - Diagrama de ordenação dos dois primeiros eixos CCA para as variáveis do solo (azul) e as variáveis foliares (vermelho) dos talhões com eucalipto nas áreas 1 e 2	84
Figura 6 - Diagrama de ordenação dos dois primeiros eixos CCA para as variáveis do solo (azul) e as variáveis dendrométricas (vermelho) dos talhões com eucalipto nas áreas 1 e 2.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização geográfica e caracterização das áreas amostradas no Sudoeste do Paraná.....	25
Tabela 2 - Parâmetros de precisão e coeficientes dos modelos ajustados para os plantios de eucalipto.....	28
Tabela 3 - Estatística descritiva dos teores de fósforo (P) do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	34
Tabela 4 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de P do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	37
Tabela 5 - Estatística descritiva dos teores de K do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	38
Tabela 6 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn para os teores médios de K do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	40
Tabela 7 - Estatística descritiva dos teores de Ca do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	41
Tabela 8 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de Ca do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	43
Tabela 9 - Estatística descritiva dos teores de Mg do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	43
Tabela 10 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de Mg do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	45
Tabela 11 - Estatística descritiva dos teores de MOS do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	46
Tabela 12 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn, considerando a matéria orgânica no solo das áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	47
Tabela 13 - Estatística descritiva dos teores de pH do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	48
Tabela 14 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de pH (CaCl ₂) do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	49
Tabela 15 - Estatística descritiva para a CTC a pH 7,0 do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	50

Tabela 16 - Estatística descritiva dos teores V% do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	51
Tabela 17 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para a V% no solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná	52
Tabela 18 - Estatística descritiva dos principais micronutrientes do solo (B, Fe e Cu) nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	54
Tabela 19 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn, considerando o Fe e o Cu do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.....	57
Tabela 20 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo, dos nutrientes foliares e as das variáveis dendrométricas dos plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná	60
Tabela 21 - Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos químicos do solo e as variáveis dendrométricas em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná	61
Tabela 22 - Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os teores de nutrientes foliares e as variáveis dendrométricas em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná	65
Tabela 23 - Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos químicos do solo e os teores de nutrientes foliares em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.	71
Tabela 24 - Autovalores e porcentagem da variância total explicada para os componentes principais obtidos	73
Tabela 25 - Coeficientes associados a cada atributo químico do solo durante a definição dos componentes principais rotacionados pelo método Varimax e Comunalidades (variância explicada)	73
Tabela 26 - Estatística da seleção do número de funções discriminantes canônicas.....	78
Tabela 27 - Coeficientes de funções discriminantes canônicas padronizados para as variáveis selecionadas	79
Tabela 28 - Autovalores e variância para os três primeiros eixos canônicos e suas respectivas correlações	81
Tabela 29 - Correlação entre as variáveis do solo, foliar e dendrométricas nos três primeiros eixos de ordenação e a significância do teste de Monte Carlo ..	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
B	Boro
Ca	Cálcio
CaCl ²	Cloreto de Cálcio
cmolc	Centimol de Carga
CTC	Capacidade de troca de cátions
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de variação
DAP	Diâmetro a altura do peito
dm ³	Decímetros Cúbicos
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Fe	Ferro
HDOM	Altura dominante
HT	Altura total
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA	Incremento médio anual
IPARDES	Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social
K	Potássio
km ²	Quilômetros quadrados
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
mmolc	Milimol de Carga
MO	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PR	Unidade da Federação - Paraná
S	Enxofre
SBCS	Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V(%)	Saturação de bases
V _{cc}	Volume com casca
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Gênero <i>Eucalyptus</i>	15
3.2	A região Sudoeste Paranaense	16
3.3	Qualidade química dos solos com plantios florestais	18
3.4	Status nutricional de plantios florestais	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1	Caracterização regional e áreas de estudo	23
4.1.1	Localização e caracterização das áreas estudadas	24
4.2	Obtenção e análise de amostras e dados	26
4.2.1	Amostras de solo	26
4.2.2	Amostras foliares	27
4.2.3	Inventário Florestal	28
4.3	Análise estatística dos atributos pesquisados	29
4.3.1	Análise descritiva inicial	29
4.3.2	Análise comparativa entre grupos pelo teste de Kruskal-Wallis	29
4.3.3	Coefficiente de correlação de Spearman	30
4.3.4	Análise Multivariada	31
4.3.5	Análise de Correspondência Canônica (CCA)	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Atributos químicos do solo	34
5.1.1	Fósforo	34
5.1.2	Potássio	38
5.1.3	Cálcio	41
5.1.4	Magnésio	43
5.1.5	Matéria Orgânica do Solo (MOS)	45
5.1.6	pH (CaCl ₂)	47
5.1.7	Capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC)	50
5.1.8	Saturação por bases (V%)	51
5.1.9	Micronutrientes (Boro, Ferro e Cobre)	54
5.2	Análise de correlação entre teores no solo, nas folhas e o crescimento	58
5.3	Análise de Componentes Principais (ACP)	72
5.4	Análise discriminante	78
5.5	Análise de Correspondência Canônica (CCA)	81
6	CONCLUSÕES	86
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal vem se expandindo a cada ano e, com este crescimento, aumentam as exigências de mercado em produtos florestais de qualidade, bem como a adoção de práticas de manejo ambientalmente saudáveis, que assegurem a sustentabilidade da produção florestal.

O Brasil possui cerca de 10,0 milhões de hectares de florestas plantadas e, deste total, 7,6 milhões de ha correspondem ao cultivo de eucalipto (76,3%), 2,0 milhões de ha com plantios de pinus e 387 mil ha com o cultivo de outras espécies. As regiões Sul e Sudeste lideram o maior valor da produção de florestas plantadas do país, com 27,68% e 41,53%, respectivamente (IBGE, 2019; APRE, 2020). Dentre os Estados, destaca-se Minas Gerais (28%), São Paulo (17%), Mato Grosso do Sul (16%), Bahia (8%), Rio Grande do Sul (7%) e Paraná (4%), em função do seu rápido crescimento e alta adaptabilidade do gênero nestas regiões, ligado ao desenvolvimento das indústrias de base florestal e consumidora de matéria-prima florestal (IBA, 2020; IBGE, 2019).

O estado do Paraná tem expressiva contribuição no setor florestal, com 1,01 milhões de hectares com plantios florestais, cerca de 255.844,55 hectares correspondem ao gênero *Eucalyptus*, representando 25,4% de sua área plantada (APRE, 2020; IBA, 2020). Conforme a Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal (APRE), os plantios florestais formados na região são liderados por empresas, cooperativas associadas ao agronegócio, além de pequenos e médios produtores rurais. Cerca da metade da madeira produzida no estado é utilizada para fins energéticos, pelo setor do agronegócio, para a secagem de grãos, produção de rações e produtos derivados de aves (APRE, 2020).

Para alcançar alta produtividade florestal, o material genético utilizado e as condições nutricionais das plantas são componentes importantes relacionados à produção de madeira. Para atender a demanda de produção e a qualidade dos povoamentos, os nutrientes devem estar contidos nas folhas em concentrações adequadas. Para tanto, o solo e fertilizantes devem suprir as necessidades desta interação, caso contrário sintomas de carência nutricional ou toxicidade podem influenciar não somente nas folhas, mas na madeira e crescimento das raízes (GONÇALVES *et al.*, 2002).

Sendo assim, faz-se necessário avaliar a relação da fertilidade química do solo, com o desempenho *Eucalyptus* sp. e os teores de nutrientes no tecido foliar, com isso identificar quais solos são mais pobres e limitam o desenvolvimento das plantas, para que assim possa destiná-lo a múltiplos uso, com a finalidade de promover seu melhor aproveitamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a relação dos atributos químicos do solo com a nutrição e crescimento de *Eucalyptus* sp. no Sudoeste do Paraná.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a os atributos químicos dos solos usados para plantio de eucalipto no Sudoeste do Paraná;
- Avaliar a relação dos teores de nutrientes do solo com as variáveis dos plantios de eucalipto na região;
- Analisar a produtividade de materiais genéticos de eucalipto e a relação com a fertilidade do solo, status nutricional e crescimento das árvores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, é originário da Austrália, onde tem aproximadamente 680 espécies, híbridos naturais e variedades (BRISOLAL; DEMARCO, 2011). Dentre as espécies manejadas no Brasil, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* são as mais estudadas por apresentarem características desejáveis para indústria de papel e celulose, chapas de fibra e uso energético (BERGER, 2000).

No segmento florestal, o eucalipto tem grande importância, devido a sua utilização como matéria-prima em diversos produtos, por apresentar materiais genéticos de rápido crescimento e alta adaptabilidade a condições edafoclimáticas diversas (SILVA *et al.*, 2014).

Com rotação aproximada de sete a oito anos, muitas plantações são estabelecidas em regiões onde há deficiências nutricionais e hídricas, em diferentes níveis, porém as variedades de híbridos e clones de *Eucalyptus*, com distintas características de adaptação edafoclimática, juntamente com a facilidade de propagação via semente ou clonagem, proporciona às regiões tropicais e subtropicais do Brasil uma maior adaptação das espécies de eucalipto (GONÇALVES *et al.*, 2005).

O melhoramento genético do eucalipto iniciou-se no Brasil através do pesquisador Dr. Edmundo Navarro de Andrade, o qual introduziu diversas espécies e procedências de eucalipto com a finalidade de identificar as melhores espécies adaptadas às condições ambientais brasileiras. Em 1941, juntamente com o pesquisador Dr. Carlos Arnaldo Kung, elaboraram um programa de melhoramento genético do eucalipto, com intuito de reduzir falhas, aumentar a altura, diâmetro e capacidade de brotação. As espécies que apontavam ser mais satisfatórias eram *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* (ASSIS *et al.*, 2015).

Diante às conquistas geradas a partir do eucalipto, atualmente os principais desafios dos programas de melhoramento genético são elevar a produtividade, adaptação a ambientes estressantes e madeira de qualidade para diversos produtos florestais. Nesta perspectiva, o procedimento de escolha das espécies de eucalipto tem se fundamentado na finalidade do produto e nas condições climáticas,

informações deste âmbito são obtidas através de programas de melhoramentos e nos ambientes onde os indivíduos serão plantados (ASSIS *et al.*, 2015).

As técnicas de melhoramento são estabelecidas combinando desenhos de cruzamentos, métodos de seleção e estrutura populacional, objetivando elevar a frequência de alelos de interesse (CASTRO *et al.*, 2016). O melhoramento genético aplicado ao gênero *Eucalyptus* apresenta-se com grande potencial, devido a sua alta capacidade produtiva e adaptabilidade das espécies, além da sua variabilidade inter e intraespecífica, que se manifestam nas propriedades químicas, físicas e anatômicas da madeira, sendo possível suprir aos mais diversos setores da produção madeireira e industrial (BELTRAME *et al.*, 2015).

No entanto, devido às diferenças de adaptabilidade dos materiais genéticos de eucalipto, tornam-se necessárias avaliações de campo testando o desenvolvimento de espécies e procedências do gênero, para identificar os materiais mais adaptados a cada região, com o monitoramento nutricional dos plantios, incluindo a análise química foliar e do solo, gerando informações úteis aos produtores na escolha de procedências superiores em produtividade (MATOS *et al.*, 2012; FERREIRA *et al.*, 2017).

3.2 A região Sudoeste Paranaense

A região Sudoeste do Paraná foi caracterizada na década de 1950, pela intensa luta de posse de terra, na exploração da madeira, no cultivo de lavouras e na criação de animais destinados à subsistência. Nas décadas de 1960 e 1970, com a regularização das terras, aumento da produção agrícola e estruturação viária, iniciou-se um processo de modernização e fortalecimento da base produtiva, com a formação de associações e cooperativas de produtores. Isso possibilitou o acesso a crédito, máquinas, insumos e comercialização das safras, inserindo os produtores no agronegócio (SANTOS, 2011).

O território se configura em uma região de significância econômica, reconhecida pela produção agrícola de milho e soja, por pastagens, atividades de criação e abate de aves e suínos e a exploração madeireira (SANTOS, 2011). Além disso, é importante ressaltar que, entre a década de 1960 a meados da década de 1980, ocorreram incentivos do poder público ao cultivo florestal, com investimentos

privados no segmento florestal e o fortalecimento da atividade no Estado, para a produção da matéria-prima para diversos usos (APRE, 2020).

Na região Sudoeste, a maioria dos municípios tem seu crescimento ligado às atividades agroindustriais, sendo observada a ocorrência de plantios florestais ligados, prioritariamente, à produção de biomassa energética para uso nos processos industriais, bem como madeira para serraria e outros usos gerais (COELHO *et al.*, 2021).

Dentre os municípios do sudoeste paranaense com área florestal plantada, pode-se citar o núcleo regional de Francisco Beltrão, no qual foram mapeados 12.734,14 ha com florestas plantadas. Desse total, cerca de 7.252,69 ha com plantios de eucalipto e 5.481,45 ha com plantios de pinus (APRE, 2020). A maioria das áreas plantadas no núcleo regional de Francisco Beltrão estão inseridas nos municípios de Enéas Marques, com 983,0 ha, Marmeleiro, com 1,841 ha e Francisco Beltrão, com 4,252 ha (IBGE, 2017).

O núcleo regional de Dois Vizinhos possui uma menor área com florestas plantadas, um total de 3.338,86 ha, abrangendo cerca de 2.825,35 ha com plantios de eucalipto e 513,51 ha com plantios de pinus (APRE, 2020). Os municípios que se destacam na produção florestal nesse núcleo são: Nova Esperança do Sudoeste, com 1.429,0 ha, Salto do Lontra, com 306,0 ha, Cruzeiro do Iguaçu, com 241,0 ha e Dois Vizinhos, com 693,0 ha (IBGE, 2017).

Os plantios florestais na região são mais frequentes em pequenas e médias propriedades rurais. Apesar do cultivo florestal ainda representar pouco em relação ao seu desempenho, é possível identificar a produção florestal associada às demais cadeias produtivas, como a utilização da matéria-prima produzida para atender a indústria consumidora na secagem de grãos, aquecimento e cama de aviário (APRE, 2020), bem como na produção de biomassa energética industrial.

Neste contexto, apesar dos municípios pertencentes ao núcleo de Francisco Beltrão e Dois Vizinhos apresentarem pequenas áreas com plantios de eucalipto, é possível identificar o potencial florestal na região, principalmente para atender o segmento agroindustrial, para a produção de aves, leite e grãos (IBGE, 2017).

Cabe ressaltar que, os municípios de Dois Vizinhos e Francisco Beltrão tem destaque econômico no setor de avicultura, sendo reconhecida por possuir maior produção e maior abate de aves do país (IBGE, 2017).

Desta forma, as florestas plantadas desempenham papel fundamental na produção diversificada de sortimentos de madeira em tora que atende as demandas específicas da região, além de constituir uma atividade econômica para pequenas e médias propriedades rurais, que representam a ampla maioria das propriedades rurais dos municípios (COELHO *et al.*, 2021).

3.3 Qualidade química dos solos com plantios florestais

O cultivo do eucalipto expandiu-se para diversas regiões do Brasil, inclusive para aquelas não tradicionalmente ocupadas pela atividade silvicultural com espécies do gênero, tornando fundamental a obtenção de informações sobre a produção e demanda de nutrientes dos plantios.

As plantações com eucalipto demandam quantidades significativas de nutrientes, principalmente nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e cálcio (Ca), principalmente devido ao uso de sistema de rotações curtas, onde a exportação de nutrientes é maior do que é geralmente adicionado a cada nova rotação (MCMAHON *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2019).

No Brasil, normalmente, os solos utilizados em plantios de eucalipto são ácidos e deficientes em matéria orgânica, significa que, para atender as necessidades do eucalipto além da adubação com NPK, algumas espécies carecem também de alguns micronutrientes tais como boro (B) e zinco (Zn), para que alcancem um crescimento adequado (GONÇALVES, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 1999).

De acordo com Silveira *et al.* (2004), o baixo acúmulo de nutrientes nos solos florestais, associados ao curto ciclo de corte mas a alta exportação dos nutrientes pela colheita, são fatores que apontam a sustentabilidade dos plantios florestais, a curto e longo prazo. A interação entre o solo e a planta, é o fator determinante para alcançar alta produtividade.

Além disso, devido ao caráter distrófico dos solos e sua deficiência em bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), as quais são fundamentais para o crescimento das plantas (GONÇALVES *et al.*, 2013). Estes estarão condicionados ao acompanhamento nutricional e a utilização de fertilizantes (SILVEIRA *et al.*, 2000).

Gonçalves *et al.* (2013) afirmam significativas respostas à fertilização em plantios de eucalipto no Brasil, no qual possibilita garantia de produtividade a longo prazo.

Cabe destacar, que o desenvolvimento das plantas ocorre em função dos nutrientes disponíveis nos solos, a exemplo o cálcio, magnésio e enxofre (MARSCHNER, 2011). A deficiência de cálcio reduz o alongamento dos pelos absorventes à zona de diferenciação radicular (TAIZ; ZEIGER, 2010). O magnésio é responsável pela constituição da molécula de clorofila, o enxofre é componente em três aminoácidos importantes, que são bases das proteínas (TAIZ; ZEIGER, 2010; MARSCHNER, 2011). Além disso, tem-se o potássio que está envolvido na fotossíntese, atua no metabolismo e transporte de carboidratos as plantas (MALAVOLTA, 1980).

Em estudo realizado por Novais *et al.* (1990) para avaliar a correção da acidez do solo, nutrição e fertilização do *Eucalyptus*, observaram boa adaptação da espécie em solos distróficos, sendo tolerante ao alumínio trocável do solo e obtendo uma melhor resposta na absorção do nitrogênio na forma amoniacal do que na nítrica.

Os mesmos autores também constataram, no estudo, que a carência em potássio e os altos níveis críticos de fósforo em enxofre no solo reduziram a sua produção. Além disso, notaram que os micronutrientes boro e zinco, são importantes para o crescimento inicial das mudas de eucalipto e, de acordo com o solo e do regime de chuvas, o transporte desses elementos até as raízes das plantas é dificultado, ocasionando em morte das gemas apicais, reduzindo assim o desenvolvimento em crescimento das plantas (NOVAIS *et al.*, 1990).

Segundo Camargo *et al.* (2008), o entendimento sobre as interações entre a planta e o ambiente fornece informações fundamentais para uma maior produtividade. Dentre essas informações, a de elevada relevância é o solo, e sua interação com as plantas e como estas acumulam e distribuem os nutrientes por ele proporcionados.

Assim, o material genético e as condições ambientais influenciam no potencial produtivo das florestas, pois uma planta com elevada eficiência na utilização de nutrientes, mesmo em condições de baixa fertilidade do solo e recursos hídricos, os nutrientes seriam mais eficientemente absorvidos pelas plantas (CAMARGO *et al.*, 2008).

Como foi constatado em estudo realizado por Zarafshar *et al.* (2020), no qual afirmam que a qualidade do solo está diretamente ligada ao crescimento do eucalipto e seu desenvolvimento sustentável. Algumas propriedades químicas do

solo como pH, capacidade de troca catiônica (CTC), teor de matéria orgânica e os níveis de nutrientes são indicadores da qualidade do solo (ZARAFSHAR *et al.*, 2020).

Conforme Rocha *et al.* (2019a), o aumento do pH do solo pode proporcionar em um acréscimo na produção de madeira do caule do eucalipto, em virtude das melhorias na disponibilidade de nutrientes do solo e na mineralização de nutrientes.

Souza *et al.* (2016), ao estudar a decomposição após a colheita do de eucalipto em dez locais do sudeste do Brasil, verificaram uma relação elevada e positiva (0,57; $p < 0,01$) entre a taxa de decomposição e o pH do solo. Conforme os autores, esse aumento na decomposição da serapilheira e da folhagem, com a calagem podem suceder em uma maior mineralização de nutrientes e, conseqüentemente, sua disponibilidade para as plantas.

Estes indicadores estão associados com a capacidade do solo em favorecer o crescimento e desenvolvimento das plantações a partir do fornecimento de nutrientes, possibilitando assim avaliar e indicar ações de correção no solo por meio de adubações e calagens (SILVA *et al.*, 2020).

Dessa forma, a análise do solo é uma ferramenta imprescindível para determinar os nutrientes limitantes, além disso, ao ser realizado antes do estabelecimento do plantio e se seguida de acordo à recomendação pode evitar deficiências nutricionais (ROCHA *et al.*, 2019a). Normalmente, a análise do solo é realizada na profundidade de 0-20 cm, nas camadas mais profundas, geralmente é realizada em solos muito pobres e em locais com alto déficit hídrico (ROCHA *et al.*, 2019a).

Gonçalves *et al.* (2011) determinaram procedimentos para o cultivo do eucalipto no Brasil, dentre elas, o cálcio, segundo nutriente mais absorvido pela maioria das espécies florestais (BARROS *et al.*, 1990). Em que a taxa de Ca trocável na profundidade de 0-20 cm a disponibilidade de Ca de 0 a 4 mmol_c é considerada baixa, ou seja, tem elevada probabilidade a resposta à aplicação de calcário. De 5 a 6 mmol_c é considerado médio, com baixa ou nenhuma resposta, e acima de 7 mmol_c sem nenhuma resposta a aplicação de Ca.

Para o eucalipto, cultura em geral de rápido crescimento e de curta rotação, os nutrientes devem ser supridos via fertilização, até cerca de três anos de idade, em quantidades suficientes para atender a demanda da espécie. Após esse período,

a ciclagem bioquímica e biogeoquímica dos nutrientes é capaz de atender à necessidade nutricional até a idade de corte (BARROS *et al.*, 2005).

Desta forma, o conhecimento dos atributos químicos dos solos em plantios florestais se torna fundamental para a compreensão dos agricultores sobre os elementos limitantes na produção, manutenção da floresta e sustentabilidade da produtividade.

3.4 Status nutricional de plantios florestais

Em plantios florestais, o manejo nutricional exige a quantificação dos estoques e dos fluxos de nutrientes no ecossistema. Nos plantios com eucalipto, a quantidade de nutrientes presente no solo e a exportada durante a exploração florestal são de fundamental importância para determinação do balanço de nutrientes e da necessidade de aplicação de fertilizantes (ZAIA; GAMA-RODRIGUES, 2004).

Para atender as exigências de povoamentos florestais, os nutrientes devem estar contidos nas folhas em proporção adequada, pois nas folhas ocorre a maioria dos processos fisiológicos e metabólicos, ou seja, o conteúdo mineral deve estar associado com o aumento da qualidade e produção do plantio florestal (SILVEIRA *et al.*, 2000).

A análise foliar é uma técnica importante para verificar o estado nutricional da floresta e para correção de deficiências que possam surgir ao longo da rotação, especialmente se combinada com a análise de solo, para apoiar as recomendações de fertilizantes após o corte. No entanto, a amostragem foliar deve ser aplicada de forma padronizada para assegurar a correta representação do local, com folhas que apresente maior confiabilidade em relação a concentrações e composição mineral (ROCHA *et al.*, 2019a). A coleta das folhas deve ser realizada na época de crescimento, nos ramos situados no terço superior da copa da árvore, coletando-se as duas primeiras folhas desenvolvidas (SILVEIRA *et al.*, 2000).

De acordo com Cunha *et al.* (2005), o transporte e acúmulo de nutrientes nos diferentes compartimentos da planta e no solo podem orientar na diferenciação entre os povoamentos florestais, especialmente no que se refere a disponibilidade de nutriente para as plantas. Esses nutrientes encontrados no sistema solo-planta (parte aérea, folhas, raízes, serapilheira e solo) são essenciais para o entendimento

da estrutura do ecossistema, bem como para determinação de estratégias que direcionem a manutenção e sustentabilidade do ecossistema florestal (SPANGENBERG *et al.*, 1996).

Dessa forma, o monitoramento do estado nutricional das plantas, mostra-se como um bom indicador de possíveis deficiências e estresse nutricional das plantas, pois nas folhas acontece à maioria dos mecanismos fisiológicos e metabólicos, refletindo um melhor estado nutricional, em relação à variação no fornecimento de um determinado nutriente seja ele pelo solo ou via fertilização (MALAVOLTA, 1987).

Além de ser um requisito fundamental para recomendação apropriada de fertilizantes, com intuito de suprir a necessidade da cultura, e conseqüentemente elevar a produtividade (MENDES *et al.*, 2012).

Segundo Gonçalves (1995), a exigência nutricional para as espécies de eucalipto se diferencia conforme sua produtividade. A exemplo tem-se o nitrogênio, a concentração ideal de N no tecido foliar seria entre 13,5 g kg⁻¹ e 18,0 g kg⁻¹, considerando dados médios para as espécies de *Eucalyptus* mais cultivadas no Brasil.

Para os teores de potássio, segundo Bellote e Silva (2000) os níveis médios adequados são entre 7,5 g kg⁻¹ a 8,3 g kg⁻¹. Já para o fósforo os níveis adequados e deficientes nas folhas para o *Eucalyptus* em estágio juvenil, conforme Malavolta (1987) são de 1,2 g kg⁻¹ nível adequado e de 0,8 g kg⁻¹, deficiente. No entanto, esses valores alteram conforme o material genético e as condições ambientais (ROCHA *et al.*, 2019a; GONÇALVES, 2011).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização regional e áreas de estudo

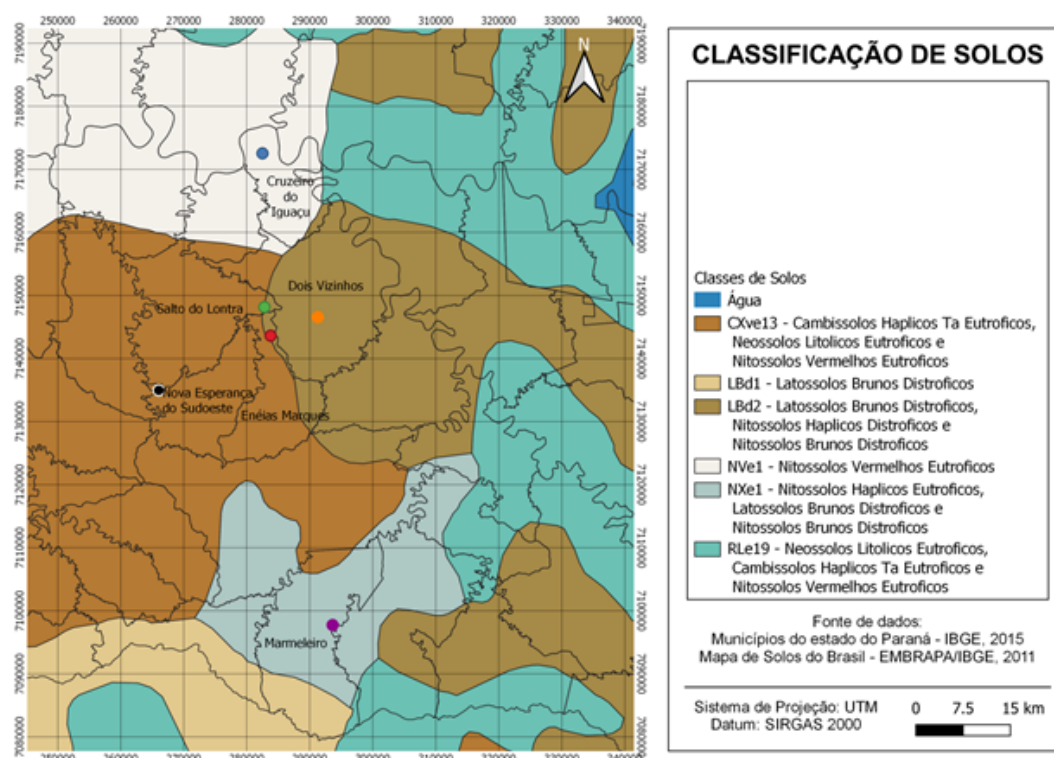
A região Sudoeste do Paraná está localizada no Terceiro Planalto Paranaense, formado por derrames basálticos, com cobertura sedimentar arenítica (IPARDES, 2004). Possui uma área total de 17.027,703 km², com aproximadamente 587.496 habitantes, em 42 municípios integrando a região, distribuídos por quatro microrregiões: Capanema, Francisco Beltrão, Pato Branco e Palmas (IPARDES, 2004).

O clima da região é classificado como Cfb, subtropical úmido, com média do mês mais quente superior a 22°C e, no mês mais frio, entre -3°C e 18°C, sem estação seca definida, verão quente e geadas pouco frequentes, com precipitação anual de 1900 a 2200 mm (ALVARES *et al.*, 2013)

O solo característico da região são os Latossolos Vermelhos, Nitossolos Vermelhos, Cambissolos Húmicos e os Neossolos Litólicos, apresenta relevo plano com declividade de 0 a 10%, que são distribuídos em 55% na extensão da região e, relevo ondulado de 10 a 20% de declividade, que ocorre em 30% da área da região (Figura 1). Em algumas áreas predominam o relevo fortemente ondulado com 20 a 45% declividade (SANTOS *et al.*, 2018; IPARDES, 2004).

O Sudoeste do Paraná está localizado na transição entre a Floresta Estacional Semidecidual (FES) e a Floresta Ombrófila Mista (FOM), caracterizada pela presença do pinheiro (*Araucaria angustifolia*) como principal espécie (IBGE, 2012).

Figura 1 - Mapa de Classificação de Solos das áreas amostradas



Fonte: Autoria própria (2021)

4.1.1 Localização e caracterização das áreas estudadas

Este estudo foi desenvolvido junto a silvicultores da região Sudoeste do Paraná, em cinco áreas com cultivos florestais, que tem como principal cultura o eucalipto para produção de cavacos de madeira (biomassa energética) destinados à indústria alimentícia para geração de vapor em caldeiras. Os plantios estão localizados nos municípios de Cruzeiro do Iguaçu, Dois Vizinhos, Marmeleiro, Nova Esperança do Sudoeste e Salto do Lontra (Tabela 1).

Tabela 1 - Localização geográfica e caracterização das áreas amostradas no Sudoeste do Paraná

Município	Coordenadas Geográficas	Altitude (m)	P. Méd. (mm)	T. Média	Clima ¹	Relevo	Solo ²
Cruzeiro do Iguaçu (1)	25°36'60"S 53°07'37"W	462	1909,7	Min: 16°C Max: 21°C	Cfa	Suave Ondulado	NVe
Nova E. Sudoeste (2)	25°53'56"S 53°15'51"W	556	1800,1	Min: 14 °C Max: 25°C	Cfa	Ondulado	CXve RLe NVe
Dois Vizinhos (3)	25°44'46"S 53°03'17"W	497	1852,0	Min: 18 °C Max: 22°C	Cfa	Suave Ondulado	LBd NXd NBd
Marmeleiro (4)	26°08'55"S 53°01'34"W	660	1934,0	Min: 18 °C Max: 22°C	Cfa	Suave Ondulado	NXe LBd NBd
Salto do Lontra (5)	25°56'27"S 53°09'58"W	466	1871,6	Min: 18 °C Max: 22°C	Cfa	Forte Ondulado	CXve RLe NVe

Legenda: ¹Classificação de Köppen de acordo com Alvares et al. (2013); ²Classificação dos solos de acordo com Embrapa (2018). P. Méd.: precipitação anual média; T.: temperatura; Min.: mínima; Max: máxima; NVe (Nitossolos Vermelhos Eutróficos); CXve (Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos); RLe (Neossolos Litólicos Eutróficos); LBd (Latosolos Brunos Distróficos); NXd (Nitossolos Háplicos Distróficos); NBd (Nitossolos Brunos Distróficos); NXe (Nitossolos Háplicos Eutróficos). Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Cfa, subtropical úmido, com temperatura média mínima do ar no mês mais frio inferior a 18°C e máxima superior a 22°C. A precipitação pluviométrica anual varia de 1900 a 2200 mm com chuvas distribuídas nas quatro estações do ano (ALVARES *et al.*, 2013).

O relevo é caracterizado em topos alongados, vertentes convexas e vales em "V" aberto, modeladas em rochas da Formação Serra Geral (MINEROPAR, 2006). Os solos predominantes são: Latossolos Brunos Distróficos, Nitossolos Háplicos Distróficos e Nitossolos Brunos Distróficos (IBGE, 2015).

A área 4 situa-se no município de Marmeleiro, o qual tem uma altitude média em torno de 660 m, latitude de 26° 08' 55" S e longitude de 53° 01' 34" W, abrange uma área territorial de 388,0 km² (IPARDES, 2021).

O clima predominante no município é classificado como Cfa, com temperatura média de 18°C no mês mais frio, e 22°C no mês mais quente. A

pluviosidade média anual é 1934 mm, com boa distribuição durante o ano todo (ALVARES *et al.*, 2013).

O território do município tem predominância de solos do tipo Nitossolos Háplicos Eutríficos, Latossolos Brunos Distróficos e Nitossolos Brunos Distroficados (IBGE, 2015). O relevo é definido pela sua homogeneidade morfológica devido ao predomínio de feições planas e ondulado (MINEROPAR, 2006).

A área 5 situa-se no município de Salto do Lontra, o qual tem uma altitude média de 466 m, latitude de 25° 46' 36" S e longitude de 53° 18' 54" W, abrangendo uma área territorial de 312,4 km² (IPARDES, 2021).

O clima característico no município é o subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com verões quentes e geadas pouco frequentes. A média anual das temperaturas nos meses mais quentes é superior a 22°C e nos meses mais frios é inferior a 18°C (ALVARES *et al.*, 2013). Os solos predominantes no município são Cambissolos Haplicos Ta Eutróficos, Neossolos Litólicos Eutróficos e Nitossolos Vermelhos Eutróficos (IBGE, 2015).

4.2 Obtenção e análise de amostras e dados

Os dados foram obtidos, relativos a cada área, com base nas informações fornecidas pelos os silvicultores da região, com a finalidade de analisar as relações entre produtividade do eucalipto, atributos químicos dos solos e os teores de nutrientes no tecido foliar, visando identificar possíveis problemas nutricionais.

4.2.1 Amostras de solo

A caracterização dos atributos químicos do solo foi determinada a partir da coleta de amostras simples, retiradas partindo do método de caminhar em zigue-zague, sendo coletadas na camada de 0-20 cm, abrangendo as áreas com plantios comerciais de eucalipto objetos deste estudo.

A quantidade de amostras simples para composição de cada amostra composta foi variável de acordo com o tamanho de cada talhão, bem como a sua uniformidade, em termos de características ambientais (declividade e profundidade aproximada do solo). Em locais onde havia mais de um material genético plantado no mesmo talhão, a amostragem era feita de forma separada para cada material.

Para cada talhão, a maioria deles com área menor que 20 hectares, a cada dois hectares, em média, foi coletada uma amostra simples. Mesmo nos talhões com áreas maiores, entre 20 e 40 hectares, o limite máximo de amostras coletadas foi padronizado em dez amostras simples para compor cada amostra composta, alterando-se, nestes casos, a distribuição espacial das mesmas.

Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e peneiradas para a preparação das mesmas visando a realização das análises.

As análises do solo foram realizadas pelo Laboratório de Solos do Instituto Brasileiro de Análises (IBRA), conforme a metodologia descrita pela EMBRAPA (2009) e pelo IAC - Instituto Agrônomo de Campinas (2009), onde foram determinados o pH em CaCl_2 , Ca, Mg e K extraídos pelo método da resina trocadora de íons, a determinação de P, Cu e Fe extraídos por Mehlich-1, o B extraído pelo método da água quente, e a matéria orgânica foi determinada via dicromato.

4.2.2 Amostras foliares

A amostragem das folhas foi realizada entre o 7º e 18º mês após o plantio. Para fins de avaliação nutricional foliar, foi realizada amostragem de acordo com o tamanho da área. Para os talhões com até dois hectares, a intensidade amostral na coleta das folhas foi de uma árvore. Para os talhões com até 20 hectares, foram amostrados dez indivíduos, alcançando uma média de um indivíduo amostrado a cada dois hectares de área de plantada. Os talhões com mais de 20 hectares de área também tiveram o limite máximo de amostragem de dez indivíduos.

Os ramos com folhas maduras foram retirados do terço médio superior da copa, com uma subamostra em cada um dos quatro quadrantes (norte, sul, leste e oeste) de cada planta, coletando-se a 5ª e 6ª folhas recém-maduras, contadas a partir da extremidade do ramo, totalizando uma amostra simples de cada planta. As folhas coletadas foram armazenadas em sacos de papel e conduzidas para análises no Laboratório de solos e plantas do Instituto Brasileiro de Análises (IBRA).

Os teores de nutrientes no tecido foliar foram determinados de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (2009) e pelo IAC - Instituto Agrônomo de Campinas (2009). Em laboratório, o N foi determinado pelo método Kjeldahl (BREMNER; MULVANEY, 1982), após digestão sulfúrica. Para P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn por digestão nitroperclórica do material vegetal, medidos por

espectrofotometria e colorimetria, o B foi extraído a partir de água quente e determinado por colorimetria.

4.2.3 Inventário Florestal

As parcelas amostrais foram alocadas e marcadas de acordo com os procedimentos internos estabelecidos pelos técnicos responsáveis pelas áreas, distribuídas de maneira aleatória nos talhões, evitando-se a instalação de parcelas em bordaduras (estradas, aceiros, florestas nativas, lavouras, etc.) e também em áreas visualmente com diferenças ambientais que poderiam prejudicar ou favorecer o crescimento das árvores.

Como variáveis, foram mensurados o DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m de altura do solo) de todas as árvores da parcela. A altura total foi medida das primeiras 10 árvores vivas de parcela, assim como a altura das 4 árvores dominantes de cada parcela.

A partir dos dados medidos no inventário florestal, foram utilizadas equações para estimar as alturas, volumes e números de árvores. Tais equações já eram de uso para as áreas de estudo, por parte dos técnicos responsáveis pelas mesmas, com boa precisão das estimativas (Tabela 2).

O modelo hipsométrico utilizado para estimar a altura total do eucalipto foi o proposto por Stoffels. Para estimar o volume com casca das árvores, utilizou o modelo volumétrico proposto por Schumacher e Hal (1933) por apresentar os melhores resultados (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros de precisão e coeficientes dos modelos ajustados para os plantios de eucalipto

Modelo	R ²	R ² aj	Syx	Syx%	β0	β1	β2
$h = \beta_0 + \beta_1(\log(dap))$	68,20	68,12	2,36	11,27	-7,480	23,301	
$h = \beta_0 + \beta_1(\log(dap))$	80,91	80,77	1,50	9,05	-7,194	21,722	
$h = \beta_0 + \beta_1(\log(dap))$	69,73	69,70	1,66	9,91	-5,888	20,134	
$\log(v) = \beta_0 + \beta_1(\log(d)) + \beta_2(\log(h))$	99,68	99,64	0,01	9,27	-4,375	1,736	1,642
$\log(v) = \beta_0 + \beta_1(\log(d)) + \beta_2(\log(h))$	99,82	99,81	0,01	4,75	-4,460	1,758	1,207

Legenda: h = altura total da árvore (m); v= volume com casca, em m³; d = diâmetro à altura de 1,30 m acima do nível do solo (DAP), em cm; h = altura comercial do fuste; log = logaritmo decimal; R²= Coeficiente de determinação; R²aj= Coeficiente de determinação ajustado; Syx.= erro padrão da estimativa; Sy.x%= erro padrão da estimativa em percentagem; β0, β1, β2 = parâmetros da regressão. Fonte: Autoria própria (2021)

4.3 Análise estatística dos atributos pesquisados

4.3.1 Análise descritiva inicial

A análise da variabilidade para todos os atributos foi, inicialmente, submetida à análise estatística descritiva. Para a análise os dados foram separados por tratamentos (as cinco áreas) e por repetições nos quais foram incluídos os dados referentes às amostras dos atributos químicos do solo.

Utilizou-se o software IBM SPSS Statistics versão 25 (IBM SPSS, 2020), onde foram calculados a média, mediana, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficientes de variação, curtose e assimetria, além da verificação dos dados pelo teste de normalidade e homogeneidade de variância a 5% de significância, com base nos testes de Kolmogorov-Smirnov (KS).

Os resultados referentes à estatística descritiva dos solos estudados em relação aos atributos químicos do solo constam no item 5.1.

4.3.2 Análise comparativa entre grupos pelo teste de Kruskal-Wallis

Com os resultados da análise descritiva dos atributos químicos do solo (item 5.1), utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, em função da hipótese da distribuição de normalidade dos dados ter sido rejeitada a 5% de significância, com base no teste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis é semelhante ao teste F utilizado na Análise de Variância (ANOVA), porém para aplicação da ANOVA deve-se atender os pressupostos de normalidade, independência e homoscedasticidade. O teste H de Kruskal-Wallis não impõe qualquer restrição à comparação (KRUSKAL; WALLIS, 1952).

O teste de Kruskal-Wallis compara as medianas de dois ou mais grupos, partindo do pressuposto que a hipótese nula de que as medianas dentro dos grupos não são significativas, mas não indica quais e nem quantos pares de grupos são diferentes. Quando se observa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Kruskal-Wallis, são realizadas comparações múltiplas compreendendo todos os pares de tratamento (KRUSKAL; WALLIS, 1952).

Quanto à análise dos dados, foram formados grupos entre os tratamentos: (cinco áreas) para comparar as variáveis do solo, entre as cinco áreas. Quando detectado diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Kruskal-Wallis, utilizou-se o teste de Dunn para realizar as comparações múltiplas envolvendo todos os pares de tratamentos.

O teste de comparações múltiplas de Dunn é utilizado após o teste de Kruskal-Wallis, o qual é aplicado sobre os postos médios obtidos nas amostras, calculando as diferenças entre os valores dois a dois, começando pela diferença maior (DUNN, 1964).

Em seguida foi utilizada a correção pelo post-hoc de Bonferroni, que altera o nível de significância (p), com a finalidade de evitar erros e corrigir o valor de p (BONFERRONI, 1936).

Em todos os testes desenvolvidos, considerou-se um nível de significância estatística de 5%, as análises foram realizadas no software IBM SPSS Corporation, versão 25 (IBM SPSS, 2020).

4.3.3 Coeficiente de correlação de Spearman

O coeficiente de correlação de postos de Spearman é uma medida de correlação não paramétrica avaliada no intervalo entre -1 e 1, quanto mais próximo estiver destes extremos, maior será a associação entre as variáveis. Este coeficiente não é sensível a assimetrias na distribuição, nem à presença de outliers, não requerendo que os dados provenham de populações normais (SPEARMAN, 1961).

Desta forma, as correlações foram determinadas pelo coeficiente de Spearman entre todos os atributos dos solos estudados, os teores nutrientes no tecido foliar e as variáveis dendrométricas do eucalipto.

Para a análise foi adotado o método *Pairwise Deletion* (exclusão por pares), que analisa todos os casos em que as variáveis de interesse estão presentes e, assim, maximiza todos os dados disponíveis por uma base de análise. Ela assume que os dados ausentes são *Missing Completely at Random* – MCAR (faltante completamente aleatório), em que a probabilidade de um valor da variável não depende dos seus próprios valores e de nenhuma das outras variáveis do modelo, pois ela assume que não existe nenhum tipo de relação entre dados e falta de dados (ENDERS, 2010).

A análise de correlação de Spearman foi realizada considerando os dados originais, para verificar as associações existentes entre os dados dos atributos químicos do solo (pH em CaCl₂, teores de P, K, Ca, Cu, Mg, B, Fe, capacidade de troca de cátions – CTC a pH 7,0, teor de matéria orgânica - MO e saturação por bases - V%), com o conjunto de dados formado pelos teores de nutrientes foliares (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Zn, Na e Al), com as variáveis dendrométricas do eucalipto (diâmetro a altura do peito – DAP; altura total – HT; altura dominante - HDOM, volume com casca - V_{cc} e incremento médio anual – IMA). Em que o primeiro e o segundo conjunto de dados representa as variáveis independentes e o terceiro as dependentes.

As análises foram realizadas no software IBM SPSS Statistics Corporation, versão 25 (IBM SPSS, 2020). Os resultados das análises de correlação de Spearman entre as variáveis analisadas, consta no item 5.2.

4.3.4 Análise Multivariada

A análise multivariada é um conjunto de técnicas voltadas para a análise de dados, que utiliza métodos estatísticos com o intuito de descrever e analisar dados de muitas variáveis simultaneamente (JOHNSON; WICHERN, 1988).

Desta forma, a verificação da importância das variáveis edáficas no cultivo de *Eucalyptus* sp. nas áreas onde se encontraram os plantios, dentro dos municípios de Nova Esperança do Sudoeste, Cruzeiro do Iguaçu e em Dois Vizinhos, foi realizada pela análise estatística multivariada, considerando o estudo para estas áreas, devido à existência de dados para a realização das análises.

Para isso foi utilizada a análise fatorial pelo método dos componentes principais (JOHNSON; WICHWRN, 1992; HAIR *et al.*, 2005; SOUZA; VICINI, 2005; FIELD, 2009; LATIN *et al.*, 2011; RIBAS; VIEIRA, 2011). Também, foi realizada uma ordenação das parcelas e variáveis utilizando a técnica multivariada escala ideal, pela normalização da variável principal.

Para verificar as diferenças e/ou semelhanças entre as áreas (1, 2 e 3), quanto aos atributos químicos do solo, foi realizada uma análise discriminante, pelo método discriminante linear de Fischer (JOHNSON; WICHWRN, 1992; RIBAS; VIEIRA, 2011).

As análises foram realizadas utilizando o software IBM SPSS Statistics Corporation, versão 25 (IBM SPSS, 2011). Os resultados das análises multivariadas entre as variáveis analisadas constam nos itens 5.3 e 5.4.

4.3.5 Análise de Correspondência Canônica (CCA)

A análise canônica é uma técnica de análise multivariada, utilizada para descrever as relações que existem entre dois grupos ou conjuntos de variáveis (HOTELLING, 1992).

A técnica consiste na combinação linear das variáveis em cada um dos grupos, de forma que a correlação entre essas duas combinações seja maximizada. Essas combinações lineares são chamadas de variáveis canônicas e suas relações são chamadas de correlações canônicas (HOTELLING, 1992).

Com intuito de melhor explicar os resultados obtidos pela análise multivariada dos atributos avaliados, foi realizada a técnica estatística multivariada de análise de correspondência canônica (CCA), visando testar a hipótese da existência de relação entre os atributos químicos do solo e os nutrientes das folhas do *Eucalyptus*, e entre os atributos químicos do solo e crescimento das árvores.

Para análise de correspondência canônica (CCA), foram organizadas duas matrizes, na primeira análise para as áreas 1 e 2, foi elaborada uma matriz com os atributos químicos do solo (P, K, Ca, Mg, MO, pH, CTC a pH 7,0, V(%), B, Fe e Cu). A segunda matriz foi criada com os teores de nutrientes foliares (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe e Zn) em vinte talhões com cultivo de eucalipto, dez em cada área.

Na segunda análise, para a área 1, foi elaborada uma primeira matriz com os atributos químicos do solo (P, K, Ca, Mg, MO, pH, CTC a pH 7,0, V(%), B, Fe e Cu) e uma segunda matriz com as variáveis dendrométricas (DAP em cm, HT em m, HDOM em m, V_{cc} em m^3/ha e IMA em $m^3/ha/ano$) em dez talhões com cultivo de eucalipto.

Na CCA, numa primeira análise, eixos foram definidos em combinação dos atributos do solo com os elementos das folhas do eucalipto para as duas áreas analisadas (1 e 2). A segunda análise foi realizada com as informações dos atributos químicos do solo com as variáveis dendrométricas do eucalipto para a área 2.

Após as combinações entre as variáveis, gerou-se os diagramas ("biplots") mostrando os talhões e os atributos químicos do solo e os nutrientes foliares no

primeiro caso e as variáveis dendrométricas no segundo caso, como vetores ou flechas, indicando a direção das mudanças destas variáveis no espaço de ordenação (TER BRAAK, 1987).

Para testar a probabilidade de acerto das relações encontradas entre a matriz composta dos atributos químicos do solo e a matriz dos nutrientes foliares na primeira análise e, dos atributos químicos do solo e a as variáveis dendrométricas do eucalipto na segunda análise, empregou-se o teste de permutação de Monte Carlo (TER BRAAK, 1987).

As análises foram efetuadas, utilizando o programa PC-ORD 6 (McCUNE; MEFFORD, 2011). Os resultados da CCA entre as variáveis analisadas, consta no item 5.5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atributos químicos do solo

5.1.1 Fósforo

Os valores médios de P dos solos estudados variaram de 1,22 a 13,90 mg dm⁻³ (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatística descritiva dos teores de fósforo (P) do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	P (mg dm ⁻³)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	1,25	0,64	0,8	0,30	1,10	3,40	63,90
2	2,87	2,51	1,58	0,80	2,80	6,00	55,13
3	1,22	0,78	0,88	0,80	0,80	3,00	72,48
4	7,43	0,29	0,53	7,00	7,00	8,00	7,20
5	13,9	19,83	4,45	9,00	15,00	17,70	32,04
Méd. Total	5,33						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Os valores médios de P dos solos estudados variaram de 1,22 a 13,90 mg dm⁻³ (Tabela 3). Nas áreas 1, 2 e 3 os teores médios de P no solo foram de 1,25; 2,87 e 1,22 mg dm⁻³, respectivamente, sendo classificados como muito baixo e baixo, enquanto nas áreas 4 e 5 o teor de P no solo foi classificado como muito alto, conforme manual de adubação e calagem do Estado do PR (SBCS, 2017).

O P possui importância essencial para o ciclo vegetativo das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2009), com participação nos processos de metabolismo energético das plantas como (ATP), na divisão celular (DNA/RNA) e na constituição de estruturas dos vegetais (TAIZ *et al.*, 2017).

A baixa disponibilidade de P nas áreas 1, 2 e 3 pode estar relacionado aos solos desses locais serem argilosos e com grande capacidade de adsorção de P, principalmente se não foi devidamente corrigida a acidez. Os níveis médios e baixo de P podem ser atribuídos à sua baixa disponibilidade em solos ácidos e pouca mobilidade deste elemento no solo, além do grau de intemperismo, textura,

composição mineralógica do solo e quantidade matéria orgânica disponível no solo (SILVA *et al.*, 2020; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020).

Segundo Sousa *et al.* (2004), as concentrações de P variam em relação ao tipo de solo, a exemplo dos solos com predominância de fosfato de ferro e alumínio, que possuem um alto poder de fixação do fosfato, tendo como consequência a não disponibilidade para as plantas, pois a maior parte do fósforo está na forma de compostos de pouca solubilidade.

Rosa *et al.* (2018) observaram que, antes da implantação do eucalipto na região sudoeste do RS, o nível de P no solo na camada de 0 a 20 cm foi 4,35 mg dm⁻³, classificado como baixo. No entanto, após um ano da implantação do plantio do eucalipto, o teor de P diminuiu para 3,55 mg dm⁻³, devido as espécies florestais nos primeiros anos demandar maiores níveis de fósforo, além de explorarem as camadas mais superficiais dos solos

Os altos teores de P nas áreas 4 e 5 podem ter relação aos corretivos e fertilizantes utilizados em rotações anteriores. Uma vez que o aumento do pH no solo através do uso de corretivos em povoamentos florestais influencia para a maior disponibilidade de P e maior eficiência da adubação fosfatada, desde de que solo tenha quantidades suficientes (SOUSA *et al.*, 2004).

Resultados similares foram observados por Paes *et al.* (2013), ao avaliarem a fertilidade do solo e a produtividade de eucalipto em plantios comerciais. Os autores observaram teores de P disponível no solo maiores que 7,5 mg dm⁻³, estando classificados como média a alta disponibilidade do nutriente.

Segundo Sousa *et al.* (2004), as concentrações de fósforo variam em relação ao tipo de solo, a exemplo dos solos com predominância de fosfato de ferro e alumínio, que possuem um alto poder de fixação do fosfato, tendo como consequência a não disponibilidade para as plantas, pois a maior parte do fósforo está na forma de compostos de pouca solubilidade.

Em estudo realizado com o objetivo de avaliar os efeitos dos povoamentos florestais de eucalipto nas propriedades do solo na região sudoeste do Rio Grande do Sul, Rosa *et al.* (2018) observaram que, antes da implantação do eucalipto, o nível de P no solo, na profundidade 0 a 20 cm, foi 4,35 mg dm⁻³, classificado na faixa como baixo a muito baixo.

No entanto, após um ano da implantação do plantio do eucalipto, os autores verificaram a diminuição dos teores de P no solo (3,55 mg dm³), devido as espécies

florestais nos primeiros anos de crescimento demandarem maiores níveis de fósforo, além de explorarem as camadas mais superficiais dos solos (ROSA *et al.*, 2018).

Resultados obtidos por Ismael *et al.* (1998) ao avaliarem os níveis de P no solo para áreas destinadas ao plantio de eucalipto, mostraram que os teores de fósforo variam em função do tipo de solo, constatando nos solos arenosos maiores níveis críticos de P do que nos solos argilosos.

As concentrações de P no solo e os aplicados via adubação devem responder à demanda das plantas em todo o seu ciclo (DIAS *et al.*, 2014). Neste sentido, a adubação fosfatada torna-se importante para garantir a produção e qualidade ideal das árvores, especialmente na fase jovem e quando o sistema radicular ainda não está desenvolvido para explorar maior volume de solo (EPSTEIN; BLOOM, 2004; NOVAIS *et al.*, 1980).

A resposta do eucalipto a adubação fosfatada pode ser influenciada pelas condições climáticas, pelo material genético, pela capacidade de fixação de P no solo e tipo de fertilizantes. O manejo correto da aplicação de P contribui para reduzir custos de fertilização e manter a produtividade dos plantios florestais (FOLTRAN *et al.*, 2019).

Para atender a demanda de fósforo nos plantios florestais no Brasil, as recomendações de aplicação de fertilizantes são baseadas na disponibilidade de nutrientes nos solos, no potencial produtivo e no balanço de entrada e saída de nutrientes (GONÇALVES, 2011; ROCHA *et al.*, 2019a).

Com relação à exportação dos nutrientes levados da área de cultivo do eucalipto no Estado Paraná, tem-se 0,12 kg t⁻¹ de P referente à quantidade exportada de nutrientes contidos nas toras com casca. Desta forma, a quantidade extraída da parte aérea da árvore para cada tonelada de tora com casca produzida de eucalipto é de 0,22 kg t⁻¹ de fósforo (SBCS, 2017).

Cabe destacar que, em povoamentos florestais, a maior exportação de nutrientes se dá na colheita. A prática mais conservacionista de aproveitamento da biomassa é colheita apenas da madeira do tronco, onde se tem o estado ideal no que se refere à diminuição do impacto nutricional da colheita florestal, evitando assim, em termos nutricionais, a necessidade de reposição de nutrientes mediante a fertilização, desde que o solo tenha em níveis adequados desses nutrientes (SCHUMACHER *et al.*, 2019).

Conforme Dias *et al.* (2014), em florestas de eucalipto, o fósforo é o principal responsável em limitar o desenvolvimento das árvores, confirmando a necessidade do nutriente no desenvolvimento inicial da espécie para solos com níveis baixos de P. No seu estudo, foi constatado que a adubação fosfatada aumentou o crescimento em diâmetro, altura e incrementou o volume do eucalipto (DIAS *et al.*, 2014).

A variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002). De acordo com estes mesmos autores, estudando coeficiente de variação em experimentos agrícolas, classificaram-nos em: inferiores a 10% como baixos; entre 10 e 20% como médios; de 20 a 30% alto e muitos altos valores acima de 30%.

Em casos de coeficiente de variação inferior a 20%, a média pode ser utilizada, pois os dados são homogêneos, CV superior a 30% indica que a média tem pouco significado e valores superiores a 60% apontam heterogeneidade nos dados, diminuindo a significância da média (LIMA *et al.*, 2017a).

Sendo assim, apenas a área 4 apresentou um baixo CV de 7,20%, enquanto, para as demais áreas, os CV são classificados como altos, demonstrando que esta diferenciação ocorre pelo fato de existir uma maior heterogeneidade em relação ao teor de fósforo nestas áreas (Tabela 3).

As áreas que diferiram significativamente quanto ao teor de P no solo, foram as áreas 1 e 2; 1 e 4; 1 e 5; e entre 3 e 5 (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de P do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
3 - 1	1,000
1 - 2	0,031*
1 - 4	0,016*
1 - 5	0,005*
3 - 2	0,639
3 - 4	0,113
3 - 5	0,044*
2 - 4	1,000
2 - 5	1,000
4 - 5	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autora, 2021. Fonte: Autoria própria (2021)

Sendo o maior conteúdo de P no solo foram nas áreas 4 e 5, no qual pode ser explicado pelo efeito residual da correção do solo e fertilização realizados anteriormente, além do acúmulo da serapilheira das árvores nas camadas superficiais do solo das áreas, ter ajudado no processo de mineralização da matéria orgânica, resultando na liberação do nutriente P no solo (SCHUMACHER *et al.*, 2019).

5.1.2 Potássio

Os teores médios de K foram mais elevados nas áreas 2 e 5, com 3,76 e 8,06 mmol_c dm⁻³, respectivamente. Os menores teores foram encontrados nos solos das áreas 3 e 4 (Tabela 5).

Tabela 5 - Estatística descritiva dos teores de K do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	K (mmol _c dm ⁻³)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	3,41	1,30	1,14	1,30	3,60	5,60	33,46
2	3,76	1,02	1,01	2,30	4,10	5,50	26,86
3	2,16	1,66	1,28	1,10	1,50	5,10	59,25
4	1,14	0,30	0,55	0,60	1,00	1,90	47,89
5	8,06	13,69	3,70	3,80	10,00	10,40	45,90
Méd. Total	3,71						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Neste estudo os valores médios de K variaram de muito alto, na área 5 com 8,06 mmol_c dm⁻³, alto nas áreas 1 e 2 com 3,41 e 3,76 mmol_c dm⁻³, respectivamente, médio na área 3 com 2,16 mmol_c dm⁻³, e baixo na área 4 com 1,14 mmol_c dm⁻³ (SBCS, 2017).

Os menores níveis de K no solo das áreas amostradas podem ser explicados devido à elevada mobilidade do nutriente, sendo lixiviado para camadas mais profundas do solo e pouco acumulado na superfície do solo (LACLAU *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2019).

Cunha *et al.* (2018) ao avaliar os atributos químicos do Cambissolo Háplico em povoamentos de *Acacia mangium* Wild, *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e *Mimosa artemisiana* localizados no município de Além Paraíba, MG, também

registraram valores médios de K de 1,1 mmol_c dm⁻³ na camada de 0-5 cm e 1,0 mmol_c dm⁻³ na camada de 5-10 cm, constatando teores moderadamente baixos, em ambas as profundidades.

Klug *et al.* (2020), ao avaliarem os nutrientes do solo em plantios de eucalipto, verificaram valores médios de K de 1,6 mmol_c dm⁻³, na profundidade de 10-20 cm do solo.

Em estudos realizados por Rosa *et al.* (2018), foi observado que os níveis de potássio na profundidade 10-20 cm antes e após 12 meses da implantação *Eucalyptus dunnii* Maiden foram 63,0 e 76,0 mg dm⁻³, respectivamente, os quais não sofreram alterações com a instalação do povoamento.

O K é um dos nutrientes indispensáveis à nutrição do eucalipto e está principalmente ligado ao balanço hídrico das plantas, atua nos processos bioquímicos e biofísicos, e no controle osmótico das células (MARSCHNER, 1995; MENDES *et al.*, 2013).

Mendes *et al.* (2013), avaliando as respostas fisiológicas dos genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* em relação à adubação potássica e disponibilidade hídrica, observaram que a adição do potássio reduziu os efeitos de déficit hídrico nos estágios iniciais de crescimento dos genótipos testados.

Os autores Sá *et al.* (2014), ao realizar o experimento em viveiro para avaliar os efeitos da aplicação de K e da umidade do solo no crescimento de mudas de *Corymbia citriodora*, não observaram efeitos significativos das diferentes doses de K no desenvolvimento da espécie, mesmo com a aplicação de maiores doses (120 mg dm⁻³), não foi verificado que o K minimizou os efeitos do estresse hídrico.

Dentre as técnicas de manejo para alcançar elevada produtividade nos plantios de eucalipto, a fertilização adequada é requisito fundamental (MENDES *et al.*, 2013). Conforme as recomendações de adubação potássica para a cultura do eucalipto, as doses de potássio devem ser aplicadas com base nas classificações dos teores de K no solo (SBCS, 2017).

Cabe ressaltar, que nas florestas de eucalipto, a quantidade de K extraído por toda parte aérea da planta, para cada tonelada de toras com casca produzida, é cerca de 1,5 kg t⁻¹ e exporta 1,0 kg t⁻¹ de nutrientes contidos nas toras de eucalipto com casca (SBCS, 2017).

O CV para K variou de 59,25% a 26,86% entre as áreas avaliadas, indicando uma alta heterogeneidade entre os dados.

Os valores do teste de Kruskal-Wallis indicaram que houve diferenças entre áreas amostradas em relação ao teor de K no solo [$X^2(4) = 18,60$; $p < 0,01$]. As áreas 4 e 2; 4 e 5 e; 3 e 5 diferiram significativamente, enquanto as demais áreas não diferiram (Tabela 6).

Tabela 6 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn para os teores médios de K do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
4 - 3	1,000
4 - 1	0,148
4 - 2	0,045*
4 - 5	0,010*
3 - 1	0,290
3 - 2	0,069
3 - 5	0,020*
1 - 2	1,000
1 - 5	0,507
2 - 5	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

As diferenças em relação aos teores de K nas áreas podem ser associadas com as características do solo, à absorção de nutrientes por meio do solo, acúmulo e qualidade de resíduos nas camadas superficiais, decomposição da matéria orgânica, além dos efeitos residuais das adubações realizadas nas áreas em rotações anteriores (KLUG *et al.*, 2020).

5.1.3 Cálcio

Para os níveis médios de Ca no solo, a menor concentração foi de 8,57 mmol_c dm⁻³ para o solo da área 4 e maior para a área 5 com 95,67 mmol_c dm⁻³ (Tabela 7).

Tabela 7 - Estatística descritiva dos teores de Ca do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	Ca (mmol _c dm ⁻³)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	43,61	105,00	10,25	27,00	45,00	79,00	23,50
2	81,27	1070,22	32,71	43,00	74,00	146,00	40,25
3	24,78	1074,69	32,78	8,00	14,00	111,00	132,28
4	8,57	84,95	9,22	2,00	4,00	22,00	107,53
5	95,67	1808,33	42,52	64,00	79,00	144,00	44,44
Méd. Total	50,78						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Neste estudo os solos das áreas 1, 2, 3 e 5, apresentaram valores considerados altos. Já na área 4 a disponibilidade de Ca no solo foi de 8,57 mmol_c dm⁻³, classificado como baixo.

O Ca é um dos macronutrientes do solo mais absorvido pela maioria das espécies florestais. O fornecimento de Ca em povoamentos florestais está geralmente associado à aplicação de calcário (SIMONETE *et al.*, 2013), embora as espécies de eucalipto sejam tolerantes a solos ácidos, a exigência de cátions básicos é relacionada a taxa de crescimento (ROCHA *et al.*, 2019b).

Segundo Rodrigues *et al.* (2016), a aplicação de calcário pode influenciar no crescimento das árvores, não apenas pelo seu efeito de diminuição da acidez do solo, mas como fonte de Ca e Mg. Resultados obtidos em seu estudo localizado no município de Três Marias, MG, em um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, evidenciaram que a aplicação de calcário mais gesso em plantações de eucalipto resultou em um aumento médio de 58% no volume da madeira (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Woiciechowski *et al.* (2018), ao estudarem a disponibilidade de nutrientes, acidez e a umidade do solo devido à aplicação de diferentes doses de biocarvão em plantios com *Eucalyptus benthamii* no município de Irati, PR, verificaram após 60

dias do plantio o valor médio de Ca de $3,0 \text{ cmolc dm}^{-3}$, nas áreas sem adubação de base e adição de biocarvão. No entanto, após 180 dias da aplicação do biocarvão foram observados elevados teores de bases trocáveis. Os autores atribuíram à incorporação do biocarvão a maior disponibilidade Ca e teor de água no solo, apontando que em solos argilosos, a utilização do biocarvão contribui para retenção de água (WOICIECHOWSKI *et al.*, 2018).

Os plantios com eucalipto podem acumular alta taxa de Ca, principalmente em povoamentos com nível produtivo alto, este acúmulo de Ca é proporcional ao estoque de biomassa ao longo da idade do plantio (ROCHA *et al.*, 2019b). Além disso, grande parte do nutriente é incorporado a casca, o que necessita ser suprido através de calagens, devido as perdas do nutriente na colheita (SBCS, 2017).

Conforme Rocha *et al.* (2019b), para atingir um nível de produção de madeira entre $40 \text{ e } 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o estoque de nutrientes de biomassa acima do solo é de $400 \text{ a } 600 \text{ kg ha}^{-1}$ de Ca, frequentemente alcançado no final da rotação.

De acordo com o manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná, se a madeira for colhida com casca, a quantidade de Ca extraído em plantios de eucalipto é $2,7 \text{ kg t}^{-1}$. Se as toras forem colhidas sem casca a quantidade exportada é de $0,6 \text{ kg t}^{-1}$ (SBCS, 2017).

Os valores encontrados para CV nas áreas amostradas foram elevados, demonstrando alta heterogeneidade em torno da média entre o Ca no solo (Tabela 7). Observa-se que houve diferenças significativas entre as áreas amostradas [$X^2(4) = 29,93$; $p < 0,01$], essas diferenças foram entre as áreas: 4 e 2; 4 e 5; 3 e 2; e 3 e 5 (Tabela 8).

Tabela 8 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de Ca do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
4 - 3	1,000
4 - 1	0,226
4 - 2	0,002*
4 - 5	0,010*
3 - 1	0,167
3 - 2	0,000*
3 - 5	0,008*
1 - 2	0,058
1 - 5	0,365
2 - 5	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

Os elevados valores de Ca nas áreas de estudo, podem estar associados à variabilidade nas características físicas e químicas, granulométricas e mineralógicas dos solos (SOUZA *et al.*, 2008; ARTUR *et al.*, 2014; MÜLLER *et al.*, 2018). Para o baixo nível de cálcio encontrado na área 3 é recomendado à calagem com a finalidade de aumentar os teores de Ca no solo (GONÇALVES *et al.*, 1997).

5.1.4 Magnésio

Para os valores médios de Mg, é possível observar uma maior concentração na área 2, com 29,36 mmol_c dm⁻³ e na área 5, com 27,0 mmol_c dm⁻³. Os valores encontrados para o CV nas áreas foram elevados, demonstrando heterogeneidade em torno da média (Tabela 9).

Tabela 9 - Estatística descritiva dos teores de Mg do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	Mg (mmol _c dm ⁻³)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	15,79	10,42	3,23	11,00	16,00	25,00	20,45
2	29,36	128,65	11,34	14,00	29,36	48,00	38,62
3	9,76	146,27	12,09	2,00	5,00	41,00	123,87
4	7,00	46,67	6,83	3,00	3,00	17,00	97,59
5	27,00	27,00	5,19	24,00	24,00	33,00	19,22
Méd. Total	17,78						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo; CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Comparando o nível adotado pelo manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, nota-se elevados teores de Mg nas áreas 1, 2 e 5 com 15,79; 29,36 e 27,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. Nas áreas 3 e 4 os valores de Mg foram 9,76 e 7,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente, sendo classificado como médio (SBCS, 2017).

Cabe ressaltar, que o magnésio é um elemento essencial que atua na constituição da célula vegetal, participa de reações importantes no desenvolvimento vegetal, como a síntese proteica, regulação do pH celular e equilíbrio entre cátions e ânions (ALFENAS *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2012). Além disso, o Mg altera o efeito tóxico do Al e também possibilita elevada eficiência no crescimento das espécies em solos ácidos (ROSOLEM *et al.*, 1984; ROCHA *et al.*, 2008; VILELA *et al.*, 2010).

De acordo com Marschner (2011), altos teores de potássio trocável no solo podem intervir na absorção do Mg, principalmente em solos com baixo nível do elemento, com cultivo de espécies exigentes em K.

Em estudo realizado em plantações de eucalipto em ciclo de longa duração, localizados em São Francisco de Paula, RS, para avaliar os nutrientes do solo caracterizado como Cambissolo Húmico Alumínico, textura franco argilosa, os autores Klug *et al.* (2020) encontraram nas camadas de 5-10 e 10-20 cm baixos teores de Mg de 0,11 e 0,09 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente.

De acordo com os autores, a baixa concentração de Mg, pode estar relacionada à velocidade de decomposição dos resíduos orgânicos e as variações na absorção de nutrientes pela espécie, visto não ter sido realizada adubação no momento da sua implantação (KLUG *et al.*, 2020).

Todavia, a aplicação de calcário deve ser realizada para manter a saturação por bases entre 25-30% ou a manutenção de Ca e Mg em teores iguais ou maiores 1,1 e 0,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, de acordo ao manual de adubação do Estado do Paraná (SBCS, 2017).

As espécies de eucalipto normalmente têm elevada eficiência de absorção de nutrientes. A quantidade de Mg proveniente do acúmulo da biomassa na superfície do solo é de 75-100 kg ha^{-1} até o final da rotação, em povoamento com produtividade de 40 e 50 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (ROCHA *et al.*, 2019b).

O Mg é um dos macronutrientes mais acumulados em componentes exportados dos povoamentos de eucalipto (Barros *et al.*, 1990), principalmente se a extração do nutriente for realizada na parte aérea da planta (com casca), as

remoções em quantidade é 0,54 kg t⁻¹. Se as toras forem colhidas sem casca o valor exportado em quantidade de nutriente é de 0,34 kg t⁻¹ para cada tonelada produzida (SBCS, 2017).

As áreas 3 e 2; 3 e 5; e entre 4 e 2 difeririam significativamente quanto ao teor Mg no solo [$X^2(4) = 34,58$; $p < 0,01$] (Tabela 10).

Tabela 10 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de Mg do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
3 - 4	1,000
3 - 1	0,210
3 - 2	0,000*
3 - 5	0,025*
4 - 1	1,000
4 - 2	0,037*
4 - 5	0,156
1 - 2	0,052
1 - 5	0,716
2 - 5	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

Os elevados teores de Mg observados nos solos com cultivo de eucalipto nas áreas estudadas podem estar associados com o conteúdo de matéria orgânica nestes solos, visto que a decomposição da serapilheira influencia no processo de mineralização do nutriente (ROCHA *et al.*, 2019b; ROCHA, 2017).

Assim como, os nutrientes influenciam na maior disponibilidade do Mg, o pH do solo, em condições de 6,5 promove nível maior de Mg no solo (FAQUIN, 2005). No entanto, nas áreas estudadas, os altos teores de Mg não podem ser explicado em função do pH nestes locais, pois este tem valores inferiores a 5,4 (JONES, 2012; COSTA, 2014).

5.1.5 Matéria Orgânica do Solo (MOS)

Os teores médios de MOS, em sua maioria variou pouco entre as áreas amostradas (Tabela 11). Este fato pode ser atribuído ao acúmulo de serapilheira do eucalipto na superfície do solo, proporcionado pela ciclagem de nutrientes eficiente nestes locais, fazendo com que aumentem os teores de MOS (ROCHA *et al.*, 2019b).

Tabela 11 - Estatística descritiva dos teores de MOS do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	MOS (g dm ⁻³)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	36,33	147,42	12,14	18,00	30,00	68,00	33,42
2	24,45	63,90	7,99	12,30	25,60	36,00	32,70
3	33,68	81,96	9,05	16,10	35,50	41,00	26,88
4	30,00	3,67	1,91	28,00	31,00	32,00	6,38
5	34,80	179,32	13,39	22,40	33,00	49,00	38,48
Méd. Total	31,85						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Em estudo do estado nutricional de plantios com *Eucalyptus saligna* Smith, França *et al.* (2021) constataram, antes do preparo do solo, nas profundidades de 10-20 cm, níveis de 2,1% de matéria orgânica do solo, este classificado como baixo, pois o ideal seria entre 2,6 a 5,0%.

Schumacher *et al.* (2019), ao estudarem a sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp., situados em pequenas propriedades rurais do Estado do Rio Grande Sul, verificaram, nas camadas de 0-20 cm em plantios com 2, 4, 6 e 8 anos de idades, teores de MO entre 1,0 a 1,5%, destacando alta acidez e baixo nível de fertilidade no solo.

Fernández *et al.* (2018), ao avaliarem a produção de biomassa de eucalipto para fins energéticos localizados em Huelva, município da Espanha, encontraram teores disponíveis de MOS de 7,2 g kg⁻¹ na camada do solo de 0-20 cm.

Constatou-se diferenças significativas entre as áreas amostradas [$X^2(4)=11,10$; $p<0,05$], sendo elas: 1 e 2. Nas outras áreas os teores de MOS não diferiram estatisticamente (Tabela 12).

Tabela 12 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn, considerando a matéria orgânica no solo das áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
2 - 4	1,000
2 - 5	1,000
2 - 1	0,023*
2 - 3	0,067
4 - 5	1,000
4 - 1	1,000
4 - 3	1,000
5 - 1	1,000
5 - 3	1,000
1 - 3	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

A concentração de MOS é diferente em grupos específicos de solos, sendo influenciada por diversos elementos que contribuem para o armazenamento da MOS em diferentes solos. Dentre eles, o clima, manejo, processos pedogênicos, como a estrutura e agregação do solo, além da associação de compostos orgânicos acima e abaixo do solo, pelas atividades microbiana, como o estado de nutrientes dos solos, condições de pH, umidade e temperatura (KÖGEL-KNABNER; AMELUNG, 2021; BATJES, 1996).

Neste estudo, assim como ocorre em áreas com florestas plantadas manejadas via manutenção dos resíduos sobre o solo, a contribuição dos resíduos de colheita e da serapilheira é significativa para a MOS. Este resultado deve-se, sobretudo, pelo fato de que povoamentos florestais serem altamente efetivos, através da ciclagem dos nutrientes, na elevação dos teores de MOS, além de intensificar o aproveitamento dos nutrientes ao longo do tempo, contribuindo para preservar a fertilidade do solo e conseqüentemente reduzir a necessidade de adubação (SILVA *et al.*, 2020; SCHUMACHER *et al.*, 2019).

5.1.6 pH (CaCl₂)

Para os níveis de pH (CaCl₂) do solo, foram encontrados valores médios variando entre 4,06 a 5,20 e CV entre 1,32% a 9,75% (Tabela 13).

Tabela 13 - Estatística descritiva dos teores de pH do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	pH (CaCl ₂)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	4,54	0,06	0,25	4,00	4,50	5,50	5,53
2	4,95	0,19	0,43	4,10	5,00	5,60	8,77
3	4,40	0,18	0,43	3,90	4,30	5,20	9,75
4	4,06	0,00	0,05	4,00	4,10	4,10	1,32
5	5,20	0,16	0,40	4,80	5,20	5,60	7,69
Méd. Total	23,15						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçú); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

A área 5 apresentou pH (CaCl₂) de 5,20, alto valor quando comparado as demais áreas (Tabela 13). Níveis de pH (CaCl₂) em torno de 5,6 a 6,0 são fundamentais para elevar a CTC efetiva do solo, reduzindo as perdas de cátions por lixiviação e por não afetar a disponibilidade de micronutrientes no solo (PAES *et al.*, 2013).

Nas áreas 3 e 4 o pH (CaCl₂) dos solos foram de 4,40 e 4,06, respectivamente, considerados baixos. Para as áreas 1 e 2 o valor de pH foi 4,54 e 4,95, respectivamente, considerado médio (Tabela 13).

Em estudo realizado pelo programa de Tolerância de Clones de Eucalipto à Água e Estresse Térmico (TECHS) no município de Telêmaco Borba, com o objetivo de analisarem os efeitos dos atributos do solo na produtividade e resposta à seca do eucalipto, encontraram valores muito baixo de pH (H₂O) cerca de 4,06 (SILVA *et al.*, 2020).

Paes *et al.* (2013) observaram na região nordeste do Estado de São Paulo, no município de Mogi Guaçu, logo após o corte raso do primeiro ciclo de um plantio de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com 12 anos de idade, valores de pH (CaCl₂) em torno de 4,0.

Valores de pH muito baixos influenciam no transporte de nutrientes nas plantas, especialmente o fósforo e micronutrientes, além de condicionar alumínio, com níveis médios altos, visto que esse elemento é absorvido principalmente por outros íons, como cálcio, magnésio e potássio, nutrientes essenciais a nutrição das plantações florestais (SILVA *et al.*, 2020; DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

Comparando as áreas amostradas com os índices de pH do solo, verifica-se valores significativos [$X^2(4) = 23,34$; $p < 0,01$], entre as áreas: 3 e 2; 3 e 5; 2 e 4 e entre 4 e 5 (Tabela 14).

Tabela 14 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para os teores de pH (CaCl₂) do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
3 - 1	0,268
3 - 2	0,003*
3 - 4	1,000
3 - 5	0,016*
1 - 2	0,397
1 - 4	0,243
1 - 5	0,451
2 - 4	0,010*
2 - 5	1,000
4 - 5	0,014*

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

Essa diferenciação entre as áreas pode ser explicada devido os baixos valores de pH observados nas áreas 3 e 4, indicando acidez ativa, pela presença de alumínio trocável. Para as demais áreas, como os valores de pH foram relativamente altos, possivelmente o Al apresenta-se parcialmente insolubilizado e não causa danos as árvores (SOBRAL *et al.*, 2015).

Rosa *et al.* (2018) observaram diferenças significativas no pH do Argissolo Vermelho Distrófico antes e após doze meses da implantação *Eucalyptus dunnii* Maiden no município de São Francisco de Assis, RS. Os solos que foram considerados muito ácidos, após a implantação do povoamento de eucalipto ocorreu um aumento do pH, este pode estar relacionado com os efeitos da adubação e da liberação dos nutrientes via decomposição das gramíneas existentes anteriormente ao plantio.

Simonete *et al.* (2013) verificaram, em áreas de dois solos, Neossolo Quartzarênico Órtico e Nitossolo Vermelho Eutroférico, na camada de 0-20 cm de cultivo de *Eucalyptus saligna* onde foi aplicado calcário dolomítico, um aumento do pH ($H_2O \geq 5,50$) e constataram diminuição do teor de Al.

Em estudo conduzido por Cunha *et al.* (2018), em um povoamento de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* no município de Além Paraíba, MG, em Cambissolo Háptico, verificaram valores de 4,6 e 4,7 de pH (H_2O) nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente.

Como também observado por Klug *et al.* (2020), em São Francisco de Paula, RS, os valores de pH (CaCl_2) variaram de 3,66 a 3,77, indicando elevada acidez em três camadas do solo caracterizado como Cambissolo Húmico Alumínico, textura franco argilosa em plantios de eucalipto.

Conforme os autores, os valores de Al foram classificados como altos, o que pode ter influenciado nos baixos valores de pH, favorecendo a solubilização do Al trocável do solo, além da ocorrência de ácidos orgânicos, devido ao acúmulo de matéria orgânica no solo nesses ambientes (KLUG *et al.*, 2020).

5.1.7 Capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC)

Os valores médios encontrados para a CTC a pH 7,0, variaram de 124,86 a 185,53 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Entre as áreas estudadas, apenas a área 2 apresentou alto CV, as demais apresentaram baixo CV (Tabela 15).

Tabela 15 - Estatística descritiva para a CTC a pH 7,0 do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	CTC a pH 7,0 ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	124,86	278,65	16,69	99,9	124,3	180,3	13,37
2	175,26	3441,58	58,66	98	171	266,3	33,47
3	154,07	1026,88	32,04	114,6	140,3	206,4	20,79
4	183,3	715,08	26,74	150,7	183,1	216,2	14,59
5	185,53	1058,5	32,53	148,1	201,5	207	17,53
Méd. Total	823,02						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Os níveis de CTC a pH 7,0 do solo nas áreas amostradas, estão entre 124,86 a 185,53 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ faixa de classificação considerada alta, e média apenas para a área 1 (SBCS, 2017).

Cunha *et al.* (2018) observaram, em áreas com plantios de eucalipto no município de Além Paraíba, MG, em Cambissolo Háplico, valores de CTC de 7,0 a 6,8 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de do solo, respectivamente.

No trabalho de Matos *et al.* (2012), em áreas com plantios comerciais de eucalipto localizados no estado do Pará, constataram que *E. grandis* x *E. pellita* e o

E. grandis x *E. urophylla*, foram os únicos que se diferenciam quanto a CTC (pH 7,0) com valores de 6,80 e 10,80 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente.

Rocha *et al.* (2015a), ao comparar as áreas de floresta nativa, plantio de eucalipto e pastagem na cidade de Garça, SP, de Argissolo Vermelho Amarelo, com os atributos químicos dos solos, obtiveram valores CTC de 41,3, 34,4 e 25,9 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente.

Como os solos das áreas avaliadas apresentaram alta CTC, não houve diferenças significativas entre as áreas amostradas com $[\chi^2(4) = 14,95; p > 0,05]$. De acordo com Maeda *et al.* (2011), dos fatores que influenciam na CTC do solo, como a espécie, quantidade de argila e o pH, o teor de matéria orgânica no solo também contribui para uma maior CTC.

5.1.8 Saturação por bases (V%)

Os valores médios de V% variaram de 8,29 a 70,13%, as áreas 3 e 4 apresentaram os menores valores. Os valores de CV variaram entre 17,48% a 95,36%, sendo muito alto nas áreas 3 e 4 e médios nas demais áreas (Tabela 16).

Tabela 16 - Estatística descritiva dos teores V% do solo na camada de 0-20 cm nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	V (%)						
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	50,88	79,11	8,89	25,00	53,00	68,00	17,48
2	67,65	281,32	16,77	23,00	70,90	85,90	24,79
3	29,28	779,72	27,92	6,00	22,50	83,70	95,36
4	8,29	53,57	7,32	4,00	4,00	19,00	88,34
5	70,13	253,85	15,93	56,00	67,00	87,40	22,72
Méd. Total	45,25						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Conforme a interpretação para parâmetros químicos do solo para saturação por bases (V%) quantifica em muito baixo (<20); baixo (21-35); médio (36-50); alto (51-70) e; muito alto (>70) (SBCS, 2017).

Segundo Ronquim (2010), a saturação por bases é um importante parâmetro da capacidade geral da fertilidade do solo, além disso, determina se o solo é

eutrófico (fértil) = $V\% \geq 50\%$ ou distrófico (pouco fértil) $V\% \leq 50\%$, desta forma $V\%$ baixo indica que há poucas quantidades de cátions, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ .

Cabe ressaltar, que os solos predominantes nas áreas são caracterizados como Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos, Nitossolos Vermelhos Eutróficos, Latossolo Vermelho e Neossolos Litólicos Eutróficos. Estes solos apresentam saturação por bases $\geq 50\%$ nos primeiros 100 cm do horizonte B, indicando a fertilidade do solo (EMBRAPA, 2018).

Comparando as áreas amostradas com os índices de $V\%$, verifica-se que houve diferenças significativas [$\chi^2(4) = 28,09$; $p < 0,01$], entre as áreas: 3 e 2; 3 e 5; 2 e 4; e 4 e 5 (Tabela 17).

Tabela 17 - Comparações múltiplas, pelo teste Dunn, para a $V\%$ no solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	p-valor ajustado
3 - 1	0,228
3 - 2	0,000*
3 - 4	1,000
3 - 5	0,031*
1 - 2	0,061
1 - 4	0,177
1 - 5	0,795
2 - 4	0,002*
2 - 5	1,000
4 - 5	0,019*

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Entretanto, observando-se a condição de fertilidade das áreas, percebe-se saturação por base muito baixa (8,3%) na área 4 e baixa (21,6%) na área 3, o que pode contribuir para reduzir a produtividade do eucalipto nestas áreas.

As áreas 1, 2 e 5 apresentaram melhores valores $V\%$, que ficaram entre 50 e 70%, apontando que o solo dispõe de grandes quantidades de cátions, o recomendado para atingir níveis de produtividade mais elevados em diversas culturas (RONQUIM, 2010).

Cunha *et al.* (2018), ao avaliarem as propriedades químicas e físicas do solo em diferentes áreas com cobertura florestais e pastagem, obtiveram valores baixos de saturação por bases, inclusive nas áreas com plantios de eucalipto, indicando

que os plantios florestais não influenciaram significativamente na saturação por bases, quando comparado a pastagem.

Num levantamento realizado no município de Mutum, região leste do Estado de Minas Gerais, em Latossolo Húmico, para verificar o efeito da calagem na nutrição mineral e no crescimento inicial do eucalipto, Rocha *et al.* (2008), verificaram saturação por bases de 11 a 12% nas camadas de 0-20 e 20-40, antes de realizar a calagem. Após a aplicação de diferentes doses de calcário, observou-se o aumento gradual da saturação por bases.

De acordo com os autores para a cultura do eucalipto em Latossolo Húmico, a recomendação de calagem é de 300 g cova⁻¹, o que indica 64% de saturação por bases no solo. Valores maiores que estes pode influenciar na diminuição do crescimento e desequilíbrio nutricional, diminuindo a relação Ca/Mg nas folhas (ROCHA *et al.*, 2008).

5.1.9 Micronutrientes (Boro, Ferro e Cobre)

Na Tabela 18 podem ser observados os resultados da análise descritiva das áreas avaliadas em relação aos teores médios de B, Fe e Cu disponíveis no solo.

Tabela 18 - Estatística descritiva dos principais micronutrientes do solo (B, Fe e Cu) nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

B (mg dm ⁻³)							
ÁREAS	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	0,65	0,03	0,17	0,40	0,68	1,04	25,28
2	0,55	0,19	0,44	0,20	0,40	1,42	79,13
3	0,41	0,02	0,16	0,20	0,49	0,56	38,33
4	0,26	0,03	0,17	0,16	0,17	0,51	64,25
5	0,44	0,05	0,22	0,20	0,50	0,62	49,17
Méd. Total	0,46						
Fe (mg dm ⁻³)							
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	27,45	105,32	10,26	12,00	25,00	47,00	37,38
2	40,06	203,07	14,25	26,00	35,80	67,00	35,57
3	16,95	25,10	5,01	7,70	19,00	21,00	29,55
4	39,00	1714,00	41,40	18,00	21,00	131,00	106,16
5	27,67	450,33	21,22	13,00	18,00	52,00	76,70
Méd. Total	30,23						
Cu (mg dm ⁻³)							
	Méd.	Var.	DP	Mín.	Med.	Máx.	CV (%)
1	8,34	5,99	2,45	4,10	8,30	16,30	29,35
2	10,22	6,06	2,46	7,10	9,80	14,70	24,09
3	13,10	81,91	9,05	8,00	9,85	31,50	69,09
4	7,49	6,80	2,61	3,50	8,00	10,20	34,84
5	7,57	21,72	4,66	3,40	6,70	12,60	61,60
Méd. Total	9,34						

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); Méd.: Média; Var.: Variância; DP: Desvio Padrão; Mín.: Mínimo; Med.: Mediana; Máx.: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

As maiores concentrações de B no solo foram nas áreas 1, 2, 3 e 5, com o baixo teor apenas na área 4 (0,26 mg dm³). Segundo Raiz *et al.* (2018), o B é essencial no crescimento e desenvolvimento das plantas, e sua baixa disponibilidade nos solos inibe o crescimento vegetativo e reprodutivo da grande maioria de culturas.

Os solos brasileiros, principalmente as áreas com plantios florestais, são altamente vulneráveis à deficiência de B, as concentrações do micronutriente totais e disponíveis variam de 30 a 60 e 0,06 a 0,5 mg dm⁻³, respectivamente (MALAVOLTA *et al.*, 1980).

No presente estudo, puderam ser verificados médios níveis de B nos solos das áreas analisadas, estando dentro da faixa de teores adequados para o cultivo do eucalipto.

Quanto ao Fe no solo, os maiores teores foram observados nas áreas 2 e 4, as áreas 1 e 5, os teores foram classificados como médios, de 27,45 e 27,67 mg dm³, respectivamente. Já a área 3 apresentou o menor valor, com 16,95 mg dm³ (Tabela 18).

Os teores de Fe nos solos, conforme descrito por Alvarez *et al.* (1999), são classificados (mg dm⁻³) como: muito baixo (≤ 8); baixo (9-18); médio (19-30); muito alto (31-45) e alto (> 45). Dessa forma, classificando os valores das áreas amostradas, a área 3 estaria na classe baixa; as áreas 1 e 5 na classe média e na classe muita alto as áreas 2 e 4.

Rodrigues *et al.* (2016), ao realizarem a caracterização química de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico no município de Três Marias, MG antes implantação do *E. urophylla* x *E. grandis*, verificaram teores de Fe, nas profundidades de 0-10 e 10-20, de 125 e 139 mg dm³, respectivamente.

Resultados obtidos por Pulrolnik *et al.* (2009), em estudo desenvolvido no município de Itamarandiba, no Vale do Jequitinhonha, MG, em Latossolo Vermelho-Amarelo sob povoamentos de *Eucalyptus urophylla*, indicaram elevados teores de óxidos de ferro e alumínio no solo, sendo um dos fatores que contribuíram para baixos estoques de carbono no povoamento.

Em estudo desenvolvido na região Oeste Paranaense, Cassol *et al.* (2018) encontraram menor concentração de Fe, igual a 2,44 mg kg⁻¹ para Neossolo Regolítico, e maior para Latossolo Vermelho, de 4,62 mg kg⁻¹. Os autores indicaram que os menores teores de Fe podem estar relacionados ao baixo desenvolvimento genético do solo em relação ao Latossolo Vermelho que apresentou teores mais elevados de Fe.

Notou-se, de modo geral, poucas variações entre as áreas estudadas, em relação aos níveis de Cu no solo. Em média, as concentrações de Cu variaram de

13,1 a 7,5 mg dm⁻³, sendo a área 3 o maior valor encontrado (Tabela 18), que pode ser explicado devido a aplicação de corretivos e fertilizantes em rotações anteriores.

Os teores de Cu (mg dm⁻³) disponíveis nos solos para o Estado do Paraná podem ser interpretados como: muito baixo (<0,2); baixo (0,2-0,5); médio (0,6-0,8); alto (0,9-3,0) e muito alto (>3,0) (SBCS, 2017). Dessa forma, todas as áreas amostradas neste estudo classificam-se como muito alto (Tabela 18).

Ao caracterizar os atributos químicos do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico para avaliar a produtividade do *E. urophylla* x *E. grandis* no município de Três Marias, MG Cerrado, Rodrigues *et al.* (2016) encontraram valores de Cu nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 de 0,20; 0,20; 0,17 e 0,13 mg dm⁻³, respectivamente.

Em estudo realizado por Morales *et al.* (2013), ao avaliarem os atributos do solo e produtividade dos clones de *Eucalyptus saligna* Smith e *Eucalyptus dunnii* na região de Campanha no Estado do Rio Grande do Sul, constataram altos teores de Cu nas profundidades do solo de 10-20 cm de: 2,51; 1,76; 1,10 e; 0,47 mg dm⁻³ para as classes de solo Argissolo Bruno Distrófico, Argissolo Vermelho Distrófico, Cambissolo Háplico Distroférico e Neossolo Regolítico Distrópico típico, respectivamente.

Matos *et al.* (2012), ao realizar caracterização química do Latossolo Amarelo Distrófico antes da instalação do plantio com eucalipto no município de Moju, região nordeste do Pará, observaram teores de Cu de 0,17 e 0,24 mg dm⁻³ nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente.

Conforme Cassol *et al.* (2018), os maiores teores de Cu encontrados em Nitossolo Vermelho e Latossolo Vermelho foram de 1,02 e 0,77 mg kg⁻¹, respectivamente, podem ser relacionados aos elevadores teores de Fe e Al verificados nesses solos.

Observa-se médio CV para o B e Cu nas áreas 1 e 2, enquanto, para as demais áreas, os CV são classificados como alto para B, Fe e Cu, demonstrando que, essa diferenciação ocorre pelo fato de existir uma maior heterogeneidade em relação às concentrações dos micronutrientes nestas áreas (Tabela 18).

Os valores do teste de Kruskal-Wallis indicaram que houve diferenças significativas entre as áreas avaliadas em relação aos elementos Fe [$X^2(4)= 11,42$; $p<0,05$] e Cu [$X^2(4)= 9,80$; $p<0,05$], com exceção do B que não houve diferença significativa entre as áreas amostradas [$X^2(4)= 12,88$; $p>0,05$].

Para as concentrações Cu e Fe, as áreas que difeririam estaticamente foram: 1 e 2; 2 e 4, respectivamente (Tabela 19).

Tabela 19 - Comparações múltiplas pelo teste Dunn, considerando o Fe e o Cu do solo nas áreas amostradas com plantios comerciais de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

ÁREAS	Fe	Cu
	p-valor ajustado	
3 - 1	1,000	1,000
3 - 2	0,321	0,803
3 - 4	1,000	0,964
3 - 5	1,000	1,000
1 - 2	0,030*	0,575
1 - 4	0,804	0,509
1 - 5	1,000	1,000
2 - 4	1,000	0,036*
2 - 5	0,670	1,000
4 - 5	1,000	1,000

Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos); Área 4 (Marmeleiro); Área 5 (Salto do Lontra); p-valor ajustado: Valores de significância ajustados pela correção de Bonferroni para múltiplos testes; * significativo com 5% probabilidade. Fonte: Autoria própria (2021)

A matéria orgânica, conforme Malavolta *et al* (1980), é importante fonte boro em solos tropicais. Além disso, em períodos longos de seca, ocorre diminuição da concentração de boro disponível do solo, sendo a disponibilidade do micronutriente é maior em períodos mais quentes e úmidos do ano, devido ao aumento dos níveis de mineralização da matéria orgânica.

Em experimento realizado para avaliar a produção de biomassa conduzido sob amostras coletadas na profundidade de 0-20 cm de Latossolo Vermelho Escuro, originário de Curvelho, MG e de Latossolo Vermelho-Amarelo originário de Itumirim, MG, foram encontradas concentrações de B de 0,14 e 0,10 mg dm³, respectivamente (RAMOS *et al.*, 2013).

Os autores observaram que os dois solos avaliados não atenderam às exigências nutricionais de B do eucalipto, e que a relação Ca/B indicaram que a aplicação de B no solo sem o fornecimento adequado de Ca pode levar a um desequilíbrio entre esses nutrientes, com possíveis efeitos no crescimento e nutrição da espécie (RAMOS *et al.*, 2013).

Diante dos resultados encontrados neste estudo, pode-se inferir que as concentrações de boro no solo podem ser explicadas pela disponibilidade da matéria orgânica nessas áreas, pelo pH do solo, pela uniformidade das precipitações durante o ano, bem como a mineralogia de cada solo.

Os solos apresentam concentrações diferentes de ferro, as quais variam conforme o material de origem ou as relações com que os diversos materiais ocorrem, tais como a umidade e atividade microbiana (SILVA *et al.*, 2008; SCHWERTMANN, 1991). O aumento nas concentrações de matéria orgânica influencia na dissolução e remobilização dos óxidos de Fe no solo (SILVA *et al.*, 2008; SCHWERTMANN, 1991).

Segundo Lindsay (1979), em solos bem drenados como nos Latossolos em geral, a forma solúvel do Fe ocorre em proporções menores, a não ser em condições de pH muito baixo, entre 3,2 a 3,7.

Outro indicativo em relação aos valores de Fe nos solos é a prática da calagem, que contribui para reduzir a toxidez do elemento em culturas sensíveis (PREZOTTI; GUARÇONI, 2013). Assim, espera-se que a que os solos das áreas possam suprir a necessidade Fe ao eucalipto a curto e médio prazo, havendo mínima possibilidade de ocorrer deficiência do elemento.

5.2 Análise de correlação entre teores no solo, nas folhas e o crescimento

Na Tabela 20 está apresentada a estatística descritiva dos atributos químicos do solo, dos nutrientes foliares e as variáveis dendrométricas: diâmetro a altura do peito (DAP), altura total (HT), altura dominante (HDOM), volume da árvore com casca, em m³/ha (V_{cc}) e incremento médio anual (IMA) do eucalipto.

Os valores médios verificados para altura total e diâmetro a altura do peito foram de 16,60 m e 13,07 cm, respectivamente (Tabela 20). Em estudo realizado por Lima *et al.* (2017a), para avaliar o desenvolvimento de *Eucalyptus urograndis* em um Neossolo Quartzarênico, obtiveram altura de 3,51 m e DAP de 2,7 cm, características inferiores ao presente estudo devido à maior idade do plantio amostrado.

O DAP, HT, HDOM e IMA apresentaram média variabilidade com CV entre 19,18 a 12,27% (Tabela 20). Corroborando com o estudo de Lima *et al.* (2017a), que encontraram coeficientes de variação de DAP e HT de 23,45% e 18,23%, respectivamente, ao avaliar as correlações lineares do desenvolvimento do eucalipto em função dos atributos químicos do solo.

A variabilidade do volume com casca das árvores foi alta, o que reflete um conjunto de dados muito heterogêneo inviabilizando a confiabilidade da média (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2002).

Esses dados concordam com os obtidos por Silva *et al.* (2020), ao avaliar a relação entre a produtividade, resposta à seca do eucalipto e os atributos dos solos em diferentes locais no Brasil, encontraram alto CV para o volume comercial com casca do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*.

É importante ressaltar que o desenvolvimento do eucalipto é influenciado pela capacidade da árvore em utilizar os nutrientes, água, luz. Essa interação da espécie com o ambiente vai ocorrer de maneira distinta de acordo as condições ambientais nas quais estão inseridas (SILVA *et al.*, 2020).

Tabela 20 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo, dos nutrientes foliares e as das variáveis dendrométricas dos plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

Atributos	Méd.	Md.	DP	Valor		CV (%)
				Mín.	Máx.	
Variáveis dendrométricas						
DAP (cm)	13,07	12,37	2,11	8,74	18,86	16,16
HT (m)	16,60	15,70	2,21	12,46	21,85	13,31
HDOM (m)	19,49	18,97	2,39	15,55	27,00	12,27
V _{cc} (m ³ /ha)	152,74	134,33	2497,55	73,21	264,12	32,71
IMA	43,05	43,63	8,26	24,40	61,70	19,18
Atributos solo						
P (mg dm ⁻³)	2,14	1,50	1,49	0,80	6,00	69,78
K (mmol _c dm ⁻³)	3,05	2,95	1,38	1,10	5,50	45,29
Ca (mmol _c dm ⁻³)	55,85	50,50	42,98	8,00	146,00	76,96
Mg (mmol _c dm ⁻³)	20,45	16,00	15,22	2,00	48,00	74,41
MOS (g dm ⁻³)	30,30	31,35	10,87	12,30	53,00	35,89
pH (CaCl ₂)	4,66	4,60	0,52	3,90	5,60	11,15
CTC (mmol _c dm ⁻³)	165,73	165,50	48,59	98,00	266,30	29,32
V (%)	47,69	62,00	30,01	6,00	85,90	62,93
B (mg dm ⁻³)	0,49	0,41	0,34	0,20	1,42	68,07
Fe (mg dm ⁻³)	38,01	31,25	26,10	15,00	131,00	68,66
Cu (mg dm ⁻³)	9,10	9,15	2,67	3,50	14,70	29,35
Nutrientes foliares						
N (g kg ⁻¹)	30,67	31,20	4,19	23,93	40,17	13,65
P (g kg ⁻¹)	1,81	1,78	0,19	1,58	2,27	10,71
K (g kg ⁻¹)	16,33	16,68	2,39	12,18	20,41	14,66
Ca (g kg ⁻¹)	6,70	6,38	1,54	5,25	11,50	22,93
Mg (g kg ⁻¹)	2,33	2,31	0,22	1,85	2,68	9,50
S (g kg ⁻¹)	1,77	1,60	0,49	1,22	2,93	27,80
B (mg kg ⁻¹)	36,61	37,00	6,38	23,70	47,49	17,44
Cu (mg kg ⁻¹)	13,57	12,50	4,56	9,00	28,00	33,61
Fe (mg kg ⁻¹)	92,68	75,00	45,00	50,00	215,00	48,56
Zn (mg kg ⁻¹)	53,36	38,53	28,52	27,90	114,50	53,45
Na (mg kg ⁻¹)	86,03	51,50	96,10	38,10	390,00	111,72
Al (mg kg ⁻¹)	123,02	110,38	57,79	35,03	235,23	46,98

Legenda: DAP: Diâmetro a altura do peito (1,30 m); HT: altura das árvores; HDOM: altura dominante; V_{cc}: volume com casca, em m³; IMA: incremento médio anual. Atributos do solo: P (fósforo); B (boro); Fe (ferro); Cu (cobre); K (potássio); Ca (Cálcio); Mg (magnésio); CTC (capacidade de troca de cátions); MOS (matéria orgânica do solo) em g dm⁻³; pH (potencial hidrogeniônico); V (saturação de bases); N (nitrogênio); S (enxofre); Zn (zinco); Na (sódio); Al (alumínio). Méd: Média; Md: Mediana; DP: Desvio Padrão; Mín: Mínimo; Máx: Máximo CV: Coeficiente de variação. Fonte: Autoria própria (2021)

Em relação os atributos químicos do solo todas as variáveis apresentaram alta variabilidade com CV acima de 60%, com exceção do pH com CV de 11,15% apresentou baixa variabilidade (Tabela 20). Resultados semelhantes para pH foram encontrados por Lima *et al.* (2017a), com CV de 11,0%.

Entre os nutrientes foliares, apenas N, P, K, Ca, Mg, S, B e Cu apresentaram baixo e médio CV entre 9,50% a 33,61%. Os demais nutrientes foliares apresentaram alto CV, apresentando uma ampla heterogeneidade nos dados (Tabela 20).

Por meio do estudo da correlação de Spearman (Tabela 21), entre os atributos químicos do solo e as variáveis dendrométricas dos plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná, foi possível observar correlações positivas e negativas entre os atributos.

Tabela 21 - Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos químicos do solo e as variáveis dendrométricas em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

Atributo químico do solo	Variáveis dendrométricas				
	DAP (cm)	HT (m)	HDOM (m)	V _{cc} (m ³ /ha)	IMA
P (mg dm ⁻³)	0,276 ^{ns}	0,360 ^{ns}	0,630**	0,351*	0,331 ^{ns}
K (mmol _c dm ⁻³)	0,157 ^{ns}	0,289 ^{ns}	0,576**	0,101 ^{ns}	0,067 ^{ns}
Ca (mmol _c dm ⁻³)	0,630**	0,659**	0,797**	0,391**	0,417 ^{ns}
Mg (mmol _c dm ⁻³)	0,620**	0,634**	0,792**	0,358*	0,441 ^{ns}
MOS (g dm ⁻³)	-0,211 ^{ns}	-0,253 ^{ns}	-0,487*	-0,455**	-0,002 ^{ns}
pH (CaCl ₂)	0,323 ^{ns}	0,351 ^{ns}	0,723**	0,361*	0,201 ^{ns}
CTC a pH 7 (mmol _c dm ⁻³)	0,543*	0,540*	0,271 ^{ns}	0,048 ^{ns}	0,451*
V (%)	0,426 ^{ns}	0,454*	0,781**	0,352*	0,308 ^{ns}
B (mg dm ⁻³)	-0,129 ^{ns}	-0,151 ^{ns}	-0,416 ^{ns}	0,236 ^{ns}	-0,254 ^{ns}
Fe (mg dm ⁻³)	0,566**	0,622**	0,354 ^{ns}	0,313*	0,617**
Cu (mg dm ⁻³)	-0,046 ^{ns}	0,066 ^{ns}	0,484*	0,059 ^{ns}	-0,164 ^{ns}

Legenda: DAP: diâmetro a altura do peito, medido a altura de 1,30 m; HT: altura total das árvores; HDOM: altura dominante; V_{cc} = volume com casca (m³ árv.⁻¹/ha) IMA: incremento médio anual (m³ ha⁻¹ ano⁻¹). **A correlação é significativa a 1% de probabilidade; * significativo a 5%; ns: não significativo. Fonte: Autoria própria (2021)

As análises indicaram correlação positiva do P do solo em relação à altura dominante (HDOM) e o volume comercial com casca (V_{cc} m³/ha) do eucalipto e do K do solo em relação HDOM (Tabela 21). O resultado para P vai de encontro com o obtido por Sgarbi (2002), onde o autor obteve correlação positiva com o índice de sítio do *Eucalyptus* sp.

No entanto, os resultados obtidos por Dalposso (2017), ao avaliar os atributos do solo e a dendrometria em uma agrofloresta, situada em Dois Vizinhos, Sudoeste do Paraná, o autor observou que para o P e pH, em três profundidades (0-5, 5-10 e 10-20 cm) do Neossolo Litólico Eutrófico, Nitossolo Vermelho Eutroférico e Nitossolo Vermelho Eutroférico, não houve correlações significativas em nenhuma das profundidades para as variáveis diâmetro a altura do peito e altura das árvores.

Fato este também foi verificado por Rocha *et al.* (2013) ao analisarem o efeito de doses de P no crescimento inicial do eucalipto no campo, observaram relações positivas no desenvolvimento e qualidade da muda, com uma maior sobrevivência a campo.

Cabe salientar que os solos brasileiros têm elevada capacidade de fixação de P, devido às altas concentrações de ferro e alumínio, ocasionando em menores concentrações de P na solução do solo, conseqüentemente diminuindo a produtividade das culturas (NOVAIS *et al.*, 2007; GODINHO, 2015).

A falta do P diminui a produtividade dos povoamentos florestais, devido o nutriente participar dos processos de divisão celular, reprodução e no metabolismo vegetal (MALAVOLTA, 1985). Todavia, as análises demonstraram relação positiva do P do solo no crescimento do eucalipto.

A relação positiva do K com a altura dominante do eucalipto indica o quanto o elemento contribui para o crescimento da espécie, visto a importância do nutriente nos processos de controle osmótico, fotossíntese e transporte de fotoassimilados (SILVA *et al.*, 2002).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2011), as espécies florestais têm raízes altamente desenvolvidas, conseguindo alcançar as camadas mais profundas do solo. Essa característica possibilita que as árvores transportem maior quantidade de nutrientes absorvidos das camadas inferiores do solo para as superiores, através do processo de ciclagem de nutrientes.

Outra relação que fica evidenciada no estudo é a correlação positiva do pH do solo entre a altura dominante das árvores (HDOM) e o volume comercial com casca (V_{cc} m³/ha) (Tabela 21). A interação entre o pH do solo com o crescimento do eucalipto é parâmetro importante para explicar a necessidade da calagem nos solos com baixo pH, uma vez que a aplicação de calcário eleva o pH, corrige a acidez do solo, além de aumentar os teores de Ca e Mg (ALBUQUERQUE *et al.*, 2003).

Os teores de Ca e Mg no solo associaram-se positivamente com o DAP, HT, HDOM e V_{cc} m³/ha das árvores. Resultados como esses são esperados, pois o magnésio é um dos nutrientes que mais se relaciona com o desenvolvimento das árvores (BELLOTE; FERREIRA, 1995).

Os resultados neste estudo vai de encontro com o de Bellote e Ferreira (1995), que encontraram correlações positivas entre o Mg no solo e a altura do

eucalipto, demonstrando ser um dos elementos a ser considerado para aumentar o crescimento das árvores, através de adubações adicionais no plantio.

Com relação à matéria orgânica do solo, pode ser observada a interação negativa entre a altura dominante das árvores (HDOM) e o volume comercial com casca (V_{cc} m³/ha) do eucalipto (Tabela 21).

Considerando a ciclagem biogeoquímica dos plantios de eucalipto ser um dos fatores que contribuíram para a MO, outro fato que a lixiviação profunda de nutrientes ocorre de forma pouco expressiva, acrescentando os nutrientes mais móveis nos solos, N e K, que conseqüentemente são assimilados a MO, e posteriormente inclusos no balanço de nutrientes de ciclos seguintes (SILVA *et al.*, 2020).

Para a CTC houve correlação positiva com as variáveis dendrométricas DAP, HT e IMA (Tabela 21). De acordo com Ronquim (2010), isso acontece devido a MO caracterizar cerca de 80% da CTC total dos solos, principalmente em Latossolos Vermelhos onde a fração mineral é pobre e a maior parte de suas cargas é inserida ao solo pela MO, em que se mostra superior na superfície do solo.

A V% apresentou correlações positivas entre as variáveis HT, HDOM e V_{cc} m³/ha (Tabela 21). Resultado contrário foi constatado por Dalposso (2017), onde apenas a área basal dos indivíduos na profundidade de 0-5 cm apresentou correlação significativa em relação a V%.

Ao analisar os atributos do solo, observa-se correlação positiva entre o teor de Fe no solo em relação ao DAP, HT, V_{cc} m³/ha e IMA do eucalipto (Tabela 21).

Cabe ressaltar, que o ferro é um micronutriente essencial para os vegetais, estando presente nos processos de fotossíntese, respiração, fixação de nitrogênio e síntese de DNA e hormônios (SAHRAWAT, 2005), sua deficiência na planta pode diminuir o crescimento e reduzir a produtividade (MALAVOLTA *et al.*, 1997; EPSTEIN; BLOOM 2006).

Além disso, é considerado um elemento pouco imobilizado pela planta (KERBAUY, 2008), quando absorvido é distribuído pelas folhas jovens e em crescimento para as raízes, caules e gemas em desenvolvimento (CAMARGO, 1970).

É comum os solos apresentarem altas concentrações de Fe, mas isto não reflete danos às plantas, pois a maior parte do nutriente encontra-se numa forma pouco disponível para as plantas. No entanto, quando submetidas a altas

concentrações de ferro as plantas absorvem e acumulam grandes quantidades deste em seus tecidos, causando toxicidade, como amarelecimento das folhas e escurecimento das raízes (GUERINOT; YI, 1994; SAHRAWAT, 2005).

Com relação ao cobre (Cu) do solo, foi verificada correlação positiva entre a HDOM das árvores (Tabela 21). Este fato pode ter sido influenciado pelo os elevados teores de MO encontrado nos solos estudados, devido este íon formar complexos estáveis facilmente com as substâncias húmicas da MO, auxiliando na disponibilidade de Cu no solo (CASSOL, 2017).

Conforme Barros *et al.* (1990), cada material genético de eucalipto tem comportamento individualizado em relação ao uso de um ou outro nutriente absorvido. Assim, levando em consideração a ampla diversidade ambiental encontrada na região de origem do *Eucalyptus*, verifica vasta diferenciação quanto ao efeito de absorção e aproveitamento dos nutrientes pelos materiais genéticos.

Quanto à correlação entre concentração de boro no solo e as variáveis dendrométricas do eucalipto não foram observadas interações significativas.

Na Tabela 22 está apresentada a correlação entre os nutrientes contidos nas folhas e as variáveis dendrométricas do eucalipto. Verificou-se correlação negativa do Ca das folhas com a HDOM e o V_{cc} (m^3/ha) do eucalipto.

Resultados semelhantes foram verificados Bellote e Silva (1999) para o cálcio nas folhas, no qual indicou correlação negativa com o crescimento do eucalipto.

Essa correlação é atribuída como efeito de diluição desse nutriente, promovido pelo crescimento das árvores. Em que, a correlação negativa entre o cálcio nas folhas e a altura dominante do eucalipto, aponta que o nutriente não restringe o seu crescimento, assim como o crescimento do eucalipto não depende necessariamente das concentrações de cálcio contido nas folhas (BELLOTE; SILVA, 1999).

Tabela 22 - Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os teores de nutrientes foliares e as variáveis dendrométricas em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná

Nutrientes foliares	Variáveis dendrométricas				
	DAP (cm)	HT (m)	HDOM (m)	V _{cc} (m ³ /ha)	IMA
N (g kg ⁻¹)	-0,002 ^{ns}	-0,073 ^{ns}	-0,330 ^{ns}	0,294 ^{ns}	-0,348 ^{ns}
P (g kg ⁻¹)	-0,037 ^{ns}	-0,086 ^{ns}	-0,275 ^{ns}	0,350*	-0,152 ^{ns}
K (g kg ⁻¹)	0,042 ^{ns}	0,068 ^{ns}	-0,024 ^{ns}	-0,173 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Ca (g kg ⁻¹)	0,038 ^{ns}	-0,102 ^{ns}	-0,585*	-0,379*	-0,213 ^{ns}
Mg (g kg ⁻¹)	0,154 ^{ns}	0,123 ^{ns}	-0,246 ^{ns}	-0,192 ^{ns}	0,216 ^{ns}
S (g kg ⁻¹)	-0,315 ^{ns}	-0,332 ^{ns}	-0,374 ^{ns}	-0,123 ^{ns}	-0,268 ^{ns}
B (mg kg ⁻¹)	0,688**	0,631*	0,741**	-0,221 ^{ns}	0,727**
Cu (mg kg ⁻¹)	-0,155 ^{ns}	-0,100 ^{ns}	-0,024 ^{ns}	0,151 ^{ns}	-0,206 ^{ns}
Fe (mg kg ⁻¹)	0,522 ^{ns}	0,575*	0,304 ^{ns}	0,116 ^{ns}	0,337 ^{ns}
Zn (mg kg ⁻¹)	0,625*	0,576*	0,176 ^{ns}	0,427**	0,466 ^{ns}
Na (mg kg ⁻¹)	0,499 ^{ns}	0,433 ^{ns}	0,310 ^{ns}	0,395*	0,481 ^{ns}
Al (mg kg ⁻¹)	0,503 ^{ns}	0,473 ^{ns}	0,367 ^{ns}	-0,093 ^{ns}	0,371 ^{ns}

Legenda: DAP: diâmetro a altura do peito, medido a altura de 1,30 m; HT: altura total das árvores; HDOM: altura dominante; V_{cc} = volume com casca (m³ árv.⁻¹/ha) IMA: incremento médio anual (m³ ha⁻¹ ano⁻¹). **A correlação é significativa a 1% de probabilidade; * significativo a 5%; ns: não significativo. Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com estudo realizado por Silveira *et al.* (2000), o teor de Ca nas folhas do eucalipto apresentou relação inversa entre a produtividade de madeira. Este fato foi atribuído ao aumento do nutriente devido à aplicação de lama de cal, como também notaram alteração nutricional devido a elevada concentração de Ca competindo com a absorção de Mg e K.

Observou-se correlação positiva do B das folhas com o DAP, HT, HTDOM e IMA do eucalipto (Tabela 22). Esse efeito positivo confirma o papel do boro na síntese de ácidos nucleicos e proteínas, no metabolismo dos fenóis e absorção radicular (MALAVOLTA, 1980).

Em relação aos micronutrientes Fe, Zn e Na contidos nas folhas, verifica-se correlações positivas do teor de Fe com a altura total do eucalipto (HT), do Zn com DAP, HT e V_{cc} (m³/ha) e Na das folhas com V_{cc} (m³/ha) (Tabela 22). Essa correlação confirma a importância do Fe na cadeia de transporte de elétrons da fotossíntese (MATOS *et al.*, 2012).

O coeficiente de correlação de Spearman para as variáveis do solo e dos nutrientes foliares do eucalipto está apresentado na Tabela 23.

Verifica-se correlação positiva do P do solo com o N das folhas (Tabela 23). Tal fato pode ser explicado pela interação sinérgica entre o P e N (ARAÚJO;

MACHADO, 2006). Como observado por Neves *et al.* (1990), em que constataram o aumento no teor de N em resposta a aplicações de P.

Comportamento similar foi verificado por Rocha *et al.* (2013), ao realizar o experimento a campo com mudas de eucalipto, os quais relataram que a aplicação de doses de P nas mudas resultou na maior concentração de N na parte aérea (ROCHA *et al.*, 2013).

Em relação à interação negativa entre a concentração de P do solo com o S nos tecidos foliares (Tabela 23) é reconhecida devido aos médios teores de P encontrados nos solos amostrados, resultando em menor absorção do elemento. Além disso, à utilização de fertilizantes em rotações anteriores com altos teores de P ou N, pode ocasionar em deficiência de S, especialmente quando a sua concentração no solo é baixa (MARTINS; KAMINSKI, 1997; UCHÔA, 2013; ROCHA *et al.*, 2015a).

Cabe ressaltar, que a absorção do S pelas plantas ocorre através do transporte de compostos com o elemento em direção às folhas em desenvolvimento, aos galhos, caules e raízes. Além disso, o S participa de vários processos do metabolismo de proteínas e em reações enzimáticas (MARSCHNER, 1995; ROCHA *et al.*, 2015b).

De acordo com Gonçalves (2011), a concentração de S ideal para o eucalipto em folhas maduras, varia de 0,5 a 1,5 g kg⁻¹. Neste estudo, os teores médios de S nas folhas foram 1,7 g kg⁻¹ (Tabela 18), esses valores são moderadamente significativos, uma vez que o S é pouco móvel nas plantas.

Além disso, a folha é o tecido que apresenta maiores quantidade de S, esse acúmulo varia de acordo com a idade do povoamento e da ciclagem através da dinâmica de decomposição da matéria orgânica sobre o solo e a mineralização desses por microrganismos (GONÇALVES, 2011).

O inverso pode acontecer em solo com carência de fósforo, devido à incorporação de S ao solo, a resposta da planta pode ser negativa, e conseqüentemente o excesso do nutriente pode afetar as vias metabólicas (BARNEY JR; BUSH, 1985; FERREIRA, 1986; ROCHA *et al.*, 2015b).

Ao analisar os atributos do solo P, Mg, pH e V%, observa-se correlação positiva com o K dos tecidos foliares (Tabela 21). Essas correlações positivas confirmam que esses atributos químicos do solo apresentaram valores significativos para o pleno desenvolvimento de materiais genéticos de eucalipto estando, em

conformidade com os avaliados por Sgarbi (2002), determinados em níveis de fertilidade de médios a altos.

Cabe destacar, os efeitos interiônicos entre K, Ca e Mg, no qual ocorrem na forma de inibição competitiva, este acontece devido a alta concentração de K no meio, inibir a absorção de Ca e Mg, ocasionando deficiência desses dois nutrientes, esse antagonismo é visível entre as correlações com a MO do solo e os teores de potássio e nitrogênio das folhas (EPSTEIN, 1975; MALAVOLTA, 1980).

A concentração de matéria orgânica observada nos solos indica efeito negativo em relação ao teor de nitrogênio e potássio dos tecidos foliares (Tabela 23). Esse comportamento negativo da MOS em relação ao N foliar, deve-se ao efeito residual de fertilizações realizadas pré-plantio, ter proporcionado uma maior à absorção do N pelas plantas (MALAVOLTA, 2006).

Observando as faixas adequadas de nitrogênio em folhas maduras de eucalipto de 13 a 18 g kg⁻¹, estabelecidos por Gonçalves *et al.* (1996), pode-se constatar (Tabela 20), que as concentrações de N nas plantas estão acima da faixa considerada ideal.

Conforme Salvador *et al.* (2015) ao avaliarem a produção de serapilheira em um povoamento de *Eucalyptus saligna*, observaram que o nitrogênio se apresentou em maior concentração nas folhas das árvores. Essa tendência ocorre devido ao nutriente participar da maioria das reações de metabolismo de compostos, em virtude da fotossíntese, respiração, multiplicação e diferenciação celular (MALAVOLTA, 1980).

Outro fato deve-se a matéria orgânica, que entre os elementos do solo, é responsável por modificações na estrutura físico-química no solo, além de proporcionar energia e nutrientes para o desenvolvimento microbiano do solo, o aumento da atividade bioquímica, que influencia a disponibilidade de nutrientes indispensáveis para as plantas, principalmente, N, P, S (VILLAR, 2007; SIQUEIRA; MOREIRA, 2002).

De acordo com Barros e Novais (1990), a maior concentração de nitrogênio no solo encontra-se na forma inorgânica. Desta forma, a capacidade de fornecimento de N do solo para as plantas tende a ser alta se o teor de matéria orgânica do solo for mais elevado.

Desse modo, a MOS além de ser importante fonte de diversos nutrientes como N e o S, influencia na troca de cátions (Al, Ca, Mg, K, Na e NH₄⁺), na

complexação de metais como o Al, bem como os nutrientes Cu e Zn e no tamponamento da acidez ativa e potencial do solo (BAYER *et al.*, 2006; MANCIN, 2010).

Assim, o acúmulo de MOS no solo promove complexo estáveis com o Al, diminuindo a ação tóxica as plantas, a sua movimentação no solo é reduzida pelo aumento da concentração de Ca, Mg e K (SALET *et al.*, 1999; MANCIN, 2010).

Desta forma, esses resultados podem ser explicados devido aos médios e altos teores de MOS no solo das áreas amostradas, com maior captação e disponibilidade do nutriente pelas árvores o que pode diminuir a absorção dos outros dois nutrientes. Outro fato pode ser explicado devido ao efeito de diluição pelo N absorvido ser distribuído na planta, relação esta interpretada como casual e sem significado fisiológico.

Outra relação negativa que fica evidenciada nesse estudo é entre as concentrações de Ca do solo com os teores de Cu das folhas (Tabela 23). O excesso de Ca e MOS pode estar influenciando na absorção de Cu, uma vez que a qualidade e quantidade de matéria orgânica no solo podem influenciar na disponibilidade e mobilidade de metais como o Cu (LEITA *et al.*, 1999).

A possível explicação deve-se ao aumento observado no teor MO nos solos amostrados, devido à decomposição da serapilheira favorecida pela calagem em rotações anteriores, além de fornecer Ca às plantas (ROCHA *et al.*, 2008).

Em povoamentos de eucalipto com alta produtividade é capaz de acumular altos índices de Ca, este proporcional ao acúmulo de biomassa no decorrer da idade, lembrando que as espécies de eucalipto possuem alta capacidade na absorção e na ciclagem de cátions básicos. Desta forma, a aplicação de calcário pode resultar no aumento do crescimento, na redução da acidez do solo, como também fonte de Ca e Mg (ROCHA *et al.*, 2019).

Ainda neste contexto, o teor foliar de Ca, eleva-se com a idade da folha até a sua abscisão, a parte da porção que não é assimilada pela planta fica na superfície do solo como serapilheira, onde ocorre a decomposição e posterior absorção pelas árvores (ROCHA *et al.*, 2019b).

Neste estudo, as concentrações de Mg observado nos solos indica correlação positiva em relação ao teor Ca e Al nos tecidos foliares (Tabela 23).

O Mg desempenha funções importantes para o crescimento e desenvolvimento do eucalipto, é essencial para a fotossíntese e, é o elemento central da molécula de clorofila (BEALE, 1999; LI *et al.*, 2019).

A absorção de nutrientes pelas plantas é complexa devido às interações que ocorrem entre os nutrientes do solo quanto na planta. Um exemplo sobre tal interação é o antagonismo catiônico que acontece entre magnésio, cálcio e potássio, de tal forma que elevadas taxas de um ou mais desses nutrientes podem decorrer na redução da absorção de outro, ainda que os teores no solo sejam suficientes (GOSNELL; LONG, 1971; MARSCHNER, 1995; GARCIA *et al.*, 1999; RHODES *et al.*, 2018).

Como pode ser observado pelo alumínio que afeta o transporte e uso dos nutrientes C, Mg, P e K, prejudicando a fixação do P em formas menos disponíveis no solo e na raiz da planta (ROY *et al.*, 1988; KOCHIAN, 1995; BASSO *et al.*, 2003).

Segundo Braccini *et al.* (1998), a tolerância ao alumínio está ligada ao baixo acúmulo e a elevada absorção e eficiência no uso dos nutrientes P e Ca e, com menor translocação do Al para a parte aérea da planta.

Entretanto, o alumínio não restringe o crescimento do eucalipto, visto que as espécies do gênero possuem alto grau de tolerância ao excesso do elemento no solo (NEVES *et al.*, 1982). Desta forma, a elevação dos níveis de MO e o teor de Ca no solo, podem ter contribuído para a disponibilidade de Ca e Al para o eucalipto.

A saturação por bases (V%) é um importante parâmetro das condições gerais de fertilidade do solo, baixo índice indica que há poucas quantidades de cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (RONQUIM, 2010).

Ao analisar os atributos do solo, de modo geral, os índices de V(%) ficaram dentro do recomendado para atingir níveis de produtividade para o eucalipto. Assim como, os valores V% no solo correlacionaram-se positivamente com os teores foliares de Ca e Al (Tabela 23).

Outro aspecto observado foi à correlação negativa entre a concentração de B do solo com os teores de Ca e B nas folhas (Tabela 23).

O B é nutriente com baixa mobilidade na planta, com maior predominância nas folhas jovens (OERTLI; RICHARDSON, 1970; RAVEN, 1980; MATTIELLO *et al.*, 2009), a carência do nutriente prejudica a permeabilidade da membrana plasmática e o fluxo de água, reduzindo a absorção dos nutrientes (NABLE *et al.*, 1997; DANNELE *et al.*, 1998; MATTIELLO *et al.*, 2009).

Os efeitos das interações do boro do solo com as concentrações de nutrientes foliares do eucalipto, possivelmente se deve a maior absorção de B no solo, que aumentou os teores de B nas folhas. Outro aspecto a ser considerado é a sua interação com cálcio, a correlação destes nutrientes com as folhas tem sido aplicada para analisar índice de toxicidade do nutriente (GUPTA, 1979; RAMOS *et al.*, 2013).

De acordo com Faquin (2005), deve ser levar em consideração a dose apropriada de boro a ser disponibilizada para a planta, devido à distância entre o nível adequado e o tóxico para a maior parte das plantas.

Resultados obtidos por Ramos *et al.* (2013), ao avaliar a relação de Ca e B em eucalipto sob doses de B, observaram que a aplicação de B no solo sem o fornecimento apropriado de Ca pode levar a um desequilíbrio nutricional, com possíveis consequências no desenvolvimento e nutrição das plantas.

A análise de correlação também evidenciou relação positiva entre as concentrações de B no solo com sódio (Na) contido nas folhas (Tabela 23). Essas interações na planta podem ocorrer durante a absorção e transporte dos elementos. Visto que, o Na é absorvido na forma iônica Na^+ e possui elevada mobilidade nos tecidos vegetais, além de ser classificado como elemento benéfico na nutrição das plantas (INOCENCIO *et al.*, 2014).

Tanto o pH como o cobre no solo mostraram correlações negativas com os teores de fósforo e enxofre das folhas (Tabela 23). Essas correlações são interpretadas como efeito de diluição desses elementos, ocasionados pela aplicação de calagem em rotações anteriores, no qual pode estar competindo com a absorção do nutriente pela as plantas (BELLOTE; SILVA, 1999).

De acordo com Cyamweshi *et al.* (2014) em solos ácidos, nutrientes importantes, como P, Ca e Mg, são indisponíveis na solução do solo para a absorção da planta devido a maior de quantidade de elementos como Al e Mn.

Com relação ao cobre do solo, observa-se correlação positiva com o nitrogênio das contido nas folhas (Tabela 23). As correlações positivas observadas apontam que o aumento na oferta do elemento no solo, através de adubações e calagens, possibilita uma maior absorção dos nutrientes pelas árvores e, conseqüentemente, uma maior produtividade (BELLOTE; FERREIRA, 1995).

Tabela 23 – Valores do coeficiente de correlação de Spearman entre os atributos químicos do solo e os teores de nutrientes foliares em plantios de eucalipto na região Sudoeste do Paraná.

Atributos do Solo	Nutrientes foliares											
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Zn	Na	Al
	(g kg ⁻¹)						(mg kg ⁻¹)					
P (mg dm ⁻³)	0,379*	-0,294 ^{ns}	0,359*	0,198 ^{ns}	0,035 ^{ns}	-0,350*	0,168 ^{ns}	-0,120 ^{ns}	-0,002 ^{ns}	0,211 ^{ns}	-0,218 ^{ns}	0,100 ^{ns}
K (mmol _c dm ⁻³)	-0,064 ^{ns}	0,024 ^{ns}	0,257 ^{ns}	0,202 ^{ns}	0,249 ^{ns}	-0,148 ^{ns}	0,304 ^{ns}	0,216 ^{ns}	-0,055 ^{ns}	0,275 ^{ns}	0,146 ^{ns}	-0,142 ^{ns}
Ca (mmol _c dm ⁻³)	-0,131 ^{ns}	-0,275 ^{ns}	0,324 ^{ns}	0,226 ^{ns}	0,025 ^{ns}	-0,221 ^{ns}	0,119 ^{ns}	-0,372*	-0,299 ^{ns}	0,085 ^{ns}	-0,075 ^{ns}	0,297 ^{ns}
Mg (mmol _c dm ⁻³)	-0,081 ^{ns}	0,032 ^{ns}	0,444**	0,375*	0,245 ^{ns}	0,150 ^{ns}	-0,065 ^{ns}	-0,243 ^{ns}	-0,075 ^{ns}	0,126 ^{ns}	-0,061 ^{ns}	0,476**
MOS (g dm ⁻³)	-0,527**	0,072 ^{ns}	-0,395*	-0,223 ^{ns}	-0,085 ^{ns}	0,126 ^{ns}	-0,003 ^{ns}	-0,098 ^{ns}	-0,178 ^{ns}	-0,285 ^{ns}	0,231 ^{ns}	-0,093 ^{ns}
pH (CaCl ₂)	0,216 ^{ns}	-0,357*	0,346*	0,205 ^{ns}	0,142 ^{ns}	-0,203 ^{ns}	-0,008 ^{ns}	-0,307 ^{ns}	-0,047 ^{ns}	0,043 ^{ns}	-0,303 ^{ns}	0,197 ^{ns}
CTC a pH 7 (mmol _c dm ⁻³)	-0,005 ^{ns}	0,012 ^{ns}	0,188 ^{ns}	0,221 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,158 ^{ns}	0,089 ^{ns}	-0,216 ^{ns}	-0,228 ^{ns}	0,122 ^{ns}	0,064 ^{ns}	0,153 ^{ns}
V (%)	0,007 ^{ns}	-0,249 ^{ns}	0,414*	0,344*	0,217 ^{ns}	-0,239 ^{ns}	0,133 ^{ns}	-0,306 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	0,137 ^{ns}	-0,138 ^{ns}	0,340*
B (mg dm ⁻³)	-0,222 ^{ns}	0,315 ^{ns}	-0,292 ^{ns}	-0,471**	-0,188 ^{ns}	0,170 ^{ns}	-0,535**	0,090 ^{ns}	-0,168 ^{ns}	-0,016 ^{ns}	0,424*	-0,206 ^{ns}
Fe (mg dm ⁻³)	0,242 ^{ns}	-0,137 ^{ns}	0,212 ^{ns}	0,019 ^{ns}	-0,078 ^{ns}	-0,263 ^{ns}	-0,176 ^{ns}	-0,147 ^{ns}	0,061 ^{ns}	0,235 ^{ns}	-0,131 ^{ns}	0,136 ^{ns}
Cu (mg dm ⁻³)	0,489**	-0,349*	0,039 ^{ns}	0,007 ^{ns}	-0,127 ^{ns}	-0,405*	0,067 ^{ns}	-0,251 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,171 ^{ns}	-0,113 ^{ns}	-0,072 ^{ns}

Legenda: **A correlação é significativa a 1% de probabilidade; * significativo a 5%; ns (não significativo). Fonte: Autoria própria (2021)

5.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

Na Tabela 24, pode ser observada a análise de componentes principais das doze variáveis do solo analisadas, objetivando avaliar a semelhança entre as áreas 1, 2 e 3 em relação aos atributos químicos do solo. Na Tabela 25 são apresentados quais atributos químicos do solo que foram significativos na formação dos componentes.

A análise fatorial pelo método de componentes principais é adequada para análise, comprovada pelo teste de esfericidade de Bartlett, cujo alto valor do teste Qui-quadrado foi de 230,69, significativo ($p < 0,001$) e, pelo teste KMO (Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adequação de amostragem) que foi de 0,632.

Segundo Ribas e Vieira (2011), o teste KMO avalia se há número suficiente de correlações significativas entre os itens para justificar a realização da análise fatorial. A medida de adequação da amostra (KMO) deve ser $> 0,70$, sendo inadequada a amostra cujo KMO for $< 0,60$.

Em conjunto, os três primeiros componentes principais, extraídos das doze variáveis originais referentes aos atributos químicos do solo, conseguem explicar 78,44% da variância total dos dados, com autovalores maiores que um (Tabela 24).

O primeiro componente com autovalor de 4,55 explicou 41,38% da variância total, e pode ser considerado o principal devido possuir as relações mais importantes das variáveis do solo (Tabela 24). As variáveis que mais influenciaram nessa classificação foram P, MOS, pH e V%, sendo os atributos que mais caracterizam os solos das áreas 1, 2 e 3 (Tabela 25).

Tabela 24 – Autovalores e porcentagem da variância total explicada para os componentes principais obtidos

CP	AV	Var. E (%)	Var. A (%)
1	4,55	41,38	41,38
2	2,68	24,37	65,75
3	1,40	12,69	78,44
4	0,92	8,35	86,79
5	0,59	5,34	92,13
6	0,33	3,03	95,16
7	0,20	1,79	96,95
8	0,17	1,51	98,46
9	0,09	0,82	99,28
10	0,05	0,47	99,75
11	0,03	0,25	100,00

Legenda: CP (componentes principais); AV (autovalores); Var. E (variância explicada); Var. A (variância acumulada). Fonte: Autoria própria (2021)

No segundo componente, a variância representou 24,37% da variação total, com autovalor de 2,68 (Tabela 24), e teve como principais variáveis correlacionadas o Ca, Mg, CTC, B e Fe (Tabela 25).

Tabela 25 – Coeficientes associados a cada atributo químico do solo durante a definição dos componentes principais rotacionados pelo método Varimax e Comunalidades (variância explicada)

Variáveis	Componentes principais			Comunalidades
	1	2	3	
P (Mehlich mg dm ⁻³)	0,846	0,133	0,139	0,752
K (Resina mmol _c dm ⁻³)	0,433	0,146	0,775	0,809
Ca (Resina mmol _c dm ⁻³)	0,448	0,774	0,275	0,875
Mg (Resina mmol _c dm ⁻³)	0,371	0,849	0,289	0,942
MOS (Oxidação g dm ⁻³)	-0,745	0,117	0,081	0,575
pH (CaCl ₂)	0,880	0,180	-0,002	0,806
CTC mmol _c dm ⁻³	0,052	0,766	-0,368	0,725
V(%)	0,844	0,370	0,054	0,852
B (Água quente mg dm ⁻³)	-0,552	0,659	0,032	0,741
Fe (Mehlich mg dm ⁻³)	0,006	0,827	0,128	0,701
Cu (Mehlich mg dm ⁻³)	0,508	-0,053	-0,769	0,852

Legenda: P (fósforo); K (potássio); Ca (Cálcio); Mg (magnésio); MOS (matéria orgânica do solo); pH (potencial hidrogeniônico); CTC (capacidade de troca de cátions – pH 7); V% (saturação de bases); B (boro); Fe (ferro); Cu (cobre). Fonte: Autoria própria (2021)

O terceiro componente, com autovalor de 1,10, explicou 12,69% da variância total (Tabela 24), onde apenas o atributo K e Cu influenciaram na classificação (Tabela 25).

Tavares et al. (2019), estudando a semelhança entre espécies florestais em relação aos atributos químicos do solo em floresta nativa, observaram no primeiro componente 37,9% da variância total, sendo que as variáveis que mais influenciaram foram V%, SB, Ca, Mg, saturação por alumínio (m%) e pH em água.

As variáveis de maior peso no primeiro e segundo componente foram pH e Mg, respectivamente (Tabela 25). Entretanto, observa-se, que apenas a MOS no primeiro componente, teve escore negativo em relação aos outros atributos, este fato indica que o efeito de variação sobre a MOS proporcionou a redução de seus valores, enquanto os valores dos outros atributos do solo aumentavam (GUEDES *et al.*, 2006).

Cabe destacar que, ao analisar a contribuição de cada variável (Comunalidade), verifica-se que o Mg contribuiu com mais de 90% da análise. Os atributos Ca, V%, Cu, K e pH, contribuíram com valores entre 80 a 90%. Já as variáveis P, CTC, B e Fe contribuíram com 60 a 70%, sendo as mais importantes na caracterização do solo das áreas analisadas (Tabela 25).

De acordo com Artur *et al.* (2014), altos valores de CTC geralmente ocorrem em locais com maiores concentrações de MO, resultando no aumento de cargas negativas e influenciando, assim, o acúmulo dos nutrientes. Como enfatizado por Freitas *et al.* (2014), os altos valores de MO retém nutrientes como Ca, Mg e K, levando ao acréscimo da CTC do solo.

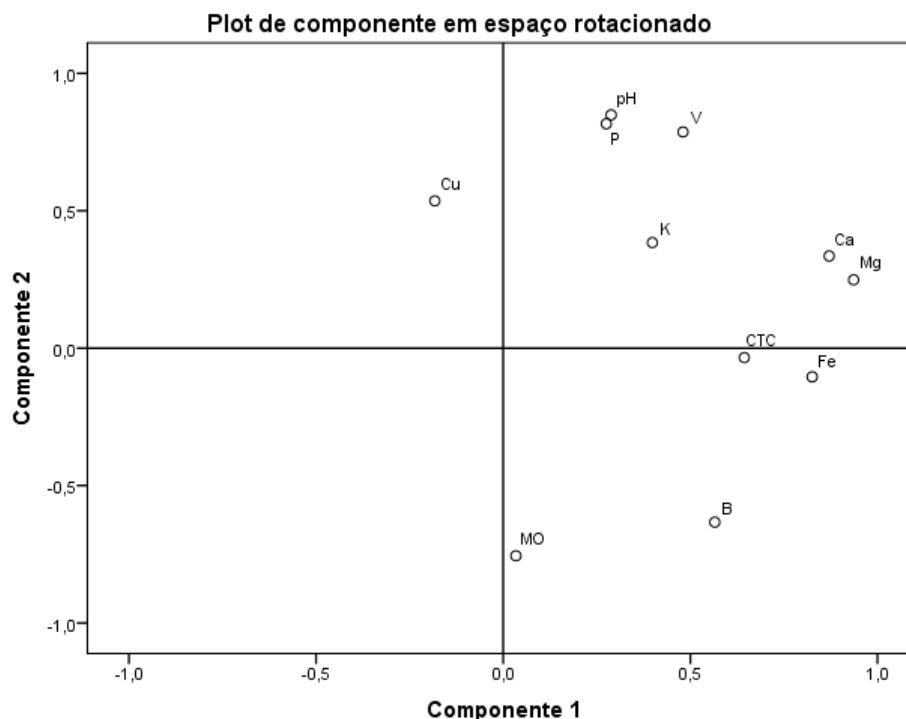
No entanto, diferentemente do ocorrido para as outras variáveis, a concentração de MOS pouco colaborou na análise, com apenas 58% (Tabela 25).

Ao analisar a produtividade do *Eucalyptus grandis* no município de Itatinga, SP, e sua relação com os atributos do solo, Gonçalves *et al.* (2012) observaram que o pH (CaCl₂), correlacionou-se positivamente com os teores de soma de base e com CTC, destacando que estes são atributos essenciais na nutrição da espécie, e como os atributos do solo influenciam na determinação da produtividade do eucalipto.

A representação gráfica das variáveis nos componentes principais permitiu caracterizar os elementos do solo mais significativos no primeiro componente, sendo eles pH, P e V%, localizados no lado superior direito e MO, por possuir valor

negativo, no lado oposto (inferior direito) do gráfico de ordenação elaborado com dois componentes (Figura 2).

Figura 2 - Ordenação das variáveis considerando os dois primeiros componentes principais



Fonte: Autoria própria (2021)

As variáveis mais correlacionadas com o segundo componente principal (Mg, Fe, Ca, CTC e B) localizam-se no lado direito do gráfico. Já as variáveis que mais correlacionaram com o terceiro componente (K e Cu) localiza-se na parte central do gráfico (Figura 2).

No correspondente ao gráfico das parcelas amostrais em relação aos atributos dos solos, obtido através do método de escala ideal mediante a normalização principal da variável (Figura 3), pode ser observado nas unidades 3, 4, 5 e 6 referentes à área 2 (talhões 3, 6, 17 e 18), respectivamente, inseridos na parte inferior à direita do gráfico, concentram-se nos locais onde predominam os solos com os maiores valores de V% e correlacionado com o primeiro componente principal (Figura 3).

Este fato pode ser explicado pela aplicação de calagem e insumos em rotações anteriores ter contribuído com o aumento do teor de magnésio e cálcio no

solo, refletindo em maior saturação de bases (V%), condição que possibilita maior disponibilidade de nutrientes na solução do solo para as plantas (LIMA *et al.*, 2017a).

Nas unidades 9 e 10 (talhão 31 e 32) da área 2 (parte superior) estão inseridos em locais com maiores concentrações de B e Fe e são mais correlacionados com o segundo componente principal (Figura 3).

Quanto ao boro ser representativo nestes talhões (Figura 3), é explicado devido os elevados teores do micronutriente observado na área 2, e estes relacionados com as maiores concentrações de MOS, resultando no acúmulo do micronutriente nas camadas superficiais (MALAVOLTA, 1980; VANDERLEI *et al.*, 1988).

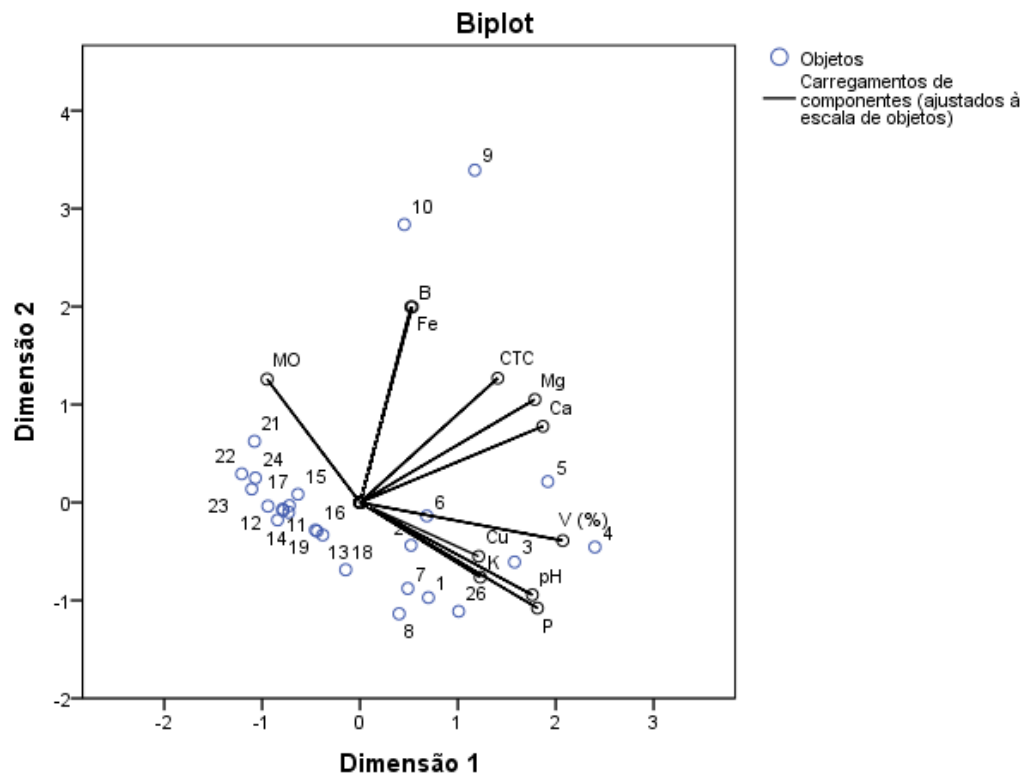
O Fe também possui forte ligação com a MOS, possibilitando a sua movimentação através do solo, em direção à raiz (GOODMAN, 1988).

Observa-se também, nas unidades 1, 2 e 7 (talhão 1, 2 e 18) área 2 e a unidade 26 da área 3 (parte inferior direita) estão em locais com os maiores teores de pH e P correlacionados ao primeiro componente, e K e Cu relacionados ao segundo componente principal (Figura 3).

Na área 1 na unidade 15 (talhão 29) e na área 2 da unidade 24 (talhão 16) no canto inferior à esquerda, estão mais correlacionados com os locais de maiores teores de MOS (Figura 3).

Os demais talhões (18, 21 e 23) da área 2, os talhões (7, 27, 28A, 28B, 30, 31, 32, 33 e 34-38) da área 1, e o talhões (12, 19 e 20) da área 3, inseridos na parte inferior à esquerda do gráfico, não estão dependentes de algum atributo do solo (Figura 3).

Figura 3 - Correlações das parcelas com as variáveis edáficas obtidas pelo método de escala ideal em duas dimensões



Normalização principal de variável.

Fonte: Autoria própria (2021)

5.4 Análise discriminante

Com a aplicação da análise discriminante, foram selecionadas duas funções discriminantes que representaram 100% da variância explicada. A primeira função, com autovalor 24,252 representou 83,7% da habilidade de discriminação. A segunda função, com autovalor 4,719 explicou 16,3% da discriminação (Tabela 26).

O teste de Lambda de Wilks para a primeira e segunda função (0,007; 0,175), respectivamente, mediu o quanto que cada função separou os casos dentro dos grupos. Os baixos valores nas funções demonstram alta habilidade discriminatória, principalmente para a função 1 (Tabela 26). O teste de qui-quadrado relacionado apontou alta probabilidade (101,939) que as médias das funções não são iguais (Tabela 26).

O valor da correlação canônica (Tabela 26) foi significativo e igual a 0,980 para a primeira função e 0,908 para a segunda função. Esse valor indica a intensidade da relação entre a variável estatística canônica, pois uma alta correlação canônica aponta que a quantidade de variância explicada entre as variáveis dependentes e independentes da função foi significativa para os conjuntos de atributos avaliados (PROTÁSIO *et al.*, 2012).

Esse alto valor da correlação canônica é um indicativo da influência dos atributos químicos do solo e a distinção das áreas amostradas.

Tabela 26 – Estatística da seleção do número de funções discriminantes canônicas

Autovalores (valores próprios)				
Função	Autovalor	% de variação	% cumulativa	Correlação canônica
1	24,252 ^a	83,7	83,7	0,980
2	4,719 ^a	16,3	100,0	0,908
a. As primeiras 2 funções discriminantes canônicas foram usadas na análise.				
Lambda de Wilks				
Teste de funções	Lambda de Wilks	Chi-quadrado	df	Sig.
1 até 2	0,007	101,939	12	0,000
2	0,175	35,746	5	0,000

Fonte: Autoria própria (2021)

Dentre os atributos do solo avaliados, selecionou-se seis variáveis com poder de discriminação das três áreas analisadas, foram elas, CTC, pH, V(%), Cu,

Fe e B, que apresentaram significância estatística ($p < 0,001$). Essas foram as variáveis que possibilitaram uma maior diferenciação entre as áreas (Tabela 27).

As funções discriminantes canônicas caracterizam a soma ponderada das variáveis em cada grupo, isto é, cada variável contém um peso distinto (PROTÁSIO *et al.*, 2012).

Os nutrientes do solo com altos pesos na primeira função discriminante foram Cu, Fe e B. Os atributos V%, pH e CTC foram os que apresentaram peso alto na segunda função. As variáveis não selecionadas na análise apresentaram pesos baixos nas funções discriminantes (Tabela 27).

Tabela 27 – Coeficientes de funções discriminantes canônicas padronizados para as variáveis selecionadas

Variáveis	Funções	
	1	2
pH (CaCl ₂)	0,963	1,987
CTC pH 7 (Cálculo mmol _c dm ⁻³)	0,390	1,244
V(%)	1,729	-2,091
B (água quente mg dm ⁻³)	-1,047	-0,484
Fe (Mehlich mg dm ⁻³)	1,798	0,353
Cu (Mehlich mg dm ⁻³)	-2,212	0,372

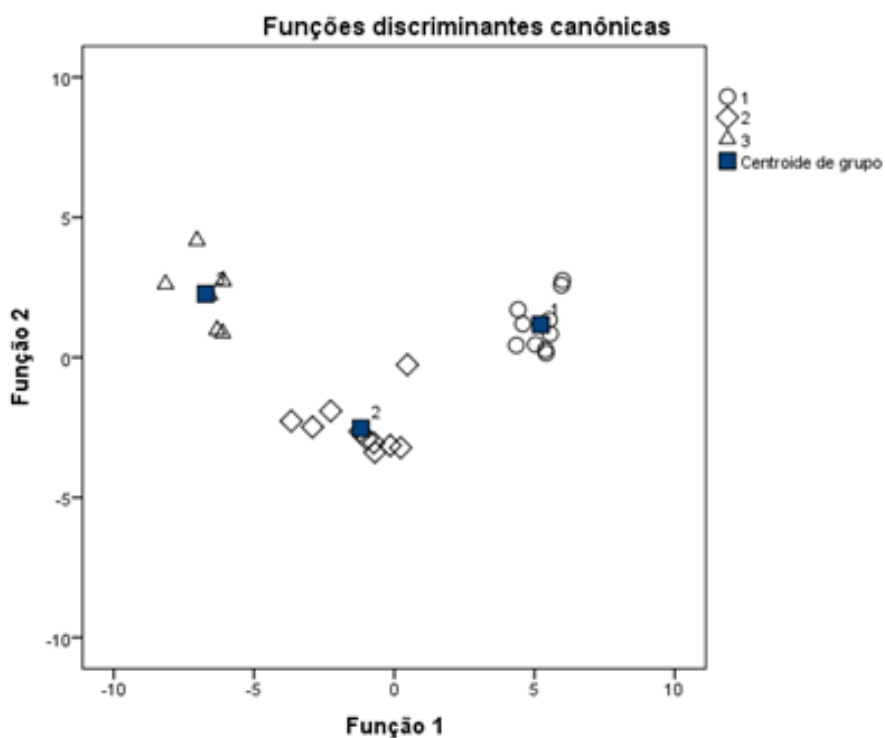
Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 4 tem-se a representação gráfica de cada área analisada nas funções discriminantes, com a ordenação dos talhões avaliados e as áreas delimitadas por cada um deles, bem como os centroides, que é o parâmetro que indica onde um novo elemento amostral será alocado de acordo com os valores observados das variáveis (MALHOTRA, 2006).

A análise discriminante indicou proporção de acertos de classificação de 100%, indicando que todos os talhões foram classificados corretamente em suas respectivas áreas, conforme Figura 4. Assim, a classificação demonstra que as três áreas apresentam diferenças em suas propriedades do solo.

Observa-se na Figura 4, que as três áreas avaliadas são diferentes entre si, pois os centroides das mesmas no gráfico de ordenação localizaram-se equidistantes, com seus respectivos talhões agrupados nos mesmos.

Figura 4 - Classificação dos talhões avaliados em suas respectivas áreas, com seus centroides



Legenda: Área 1 (Cruzeiro do Iguaçu); Área 2 (Nova E. do Sudoeste); Área 3 (Dois Vizinhos).
Fonte: Autoria própria (2021)

O conteúdo de nutrientes do solo é um bom parâmetro da qualidade do solo (ZARAFSHAR *et al.*, 2020). Com base nestes resultados, levando em consideração as variáveis analisadas, houve distinção entre as áreas ao comparar os atributos do solo, em que a área 1 apresentou os maiores valores de B, a área 2 possui maiores valores de P, K, Ca, Mg, pH, CTC, V% e Fe. Já a área 3, possui os maiores valores de MO e Cu.

5.5 Análise de Correspondência Canônica (CCA)

Na Tabela 28 encontram-se os resultados obtidos através da análise de correspondência canônica (CCA) entre os atributos químicos do solo e os nutrientes foliares do eucalipto nas áreas 1 e 2, e os atributos químicos do solo e as variáveis dendrométricas do eucalipto na área 2.

Tabela 28 – Autovalores e variância para os três primeiros eixos canônicos e suas respectivas correlações

Correlações	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
Solo – Análise Foliar			
Autovalores	0,012	0,008	0,002
Variância explicada (%)	28,100	18,900	4,300
Variância acumulada (%)	28,100	47,000	51,300
Correlação de Pearson, Solo-Análise Foliar	0,929	0,833	0,456
Correlação de Kendall, Solo-Análise Foliar	0,762	0,603	0,233
Solo – Variáveis dendrométricas			
Autovalores	0,013	0,011	0,002
Variância explicada (%)	33,200	27,600	5,200
Variância acumulada (%)	33,200	60,700	66,000
Correlação de Pearson, Solo-Variáveis dendrométricas	0,867	0,853	0,970
Correlação de Kendall, Solo-Variáveis dendrométricas	0,644	0,600	0,788

Fonte: Autoria própria (2021)

Os autovalores para os três primeiros eixos de ordenação para as variáveis do solo e as variáveis foliar nas áreas 1 e 2, foram, respectivamente, 0,012; 0,008 e 0,002. Os três explicaram 28,1; 18,9 e 4,3%, respectivamente, um total de 51,3% da variância dos dados, os dois primeiros eixos explicaram apenas 47,0% da variância total dos dados (Tabela 28).

Os resultados dos autovalores para as variáveis do solo e as variáveis dendrométricas na área 2, nos três eixos foram, respectivamente, 0,013; 0,011 e 0,002. Os três explicaram 66,0% da variância total dos dados, cada um dos eixos de ordenação explicou 33,2; 27,6 e 5,2%, respectivamente, da variância total. Os dois primeiros eixos explicaram 60,7% da variância total dos dados (Tabela 28).

Os autovalores nas duas análises realizadas apresentaram valores muito baixos ($<0,5$), conforme Ter Braak (1995). Assim como, a variância total dos dois primeiros eixos nas duas análises indicou “ruído” o que significa que a ordenação deixou uma considerável variância remanescente (ruído) sem explicação.

No entanto, valores assim são comuns em dados ecológicos e isto não prejudica a significância das relações de solo com as variáveis foliares e dendrométricas do eucalipto (TER BRAAK, 1995). Além disso, as altas correlações, tanto de Pearson como de Kendall, dos dois primeiros eixos formados, apontam a significância das relações dos atributos químicos do solo com os nutrientes das folhas e o crescimento das árvores.

Esses resultados indicam que os atributos químicos do solo explicam parcialmente as variações nos teores de nutrientes foliares nas áreas 1 e 2 e as variáveis dendrométricas do eucalipto na área 2. A variância restante não explicada nas análises (48,7% e 39,3%) é explicada por outras variáveis não analisadas no estudo.

Conforme Ter Braak e Prentice (1988), perturbações não explicadas pela CCA são vistas como naturais e não comprometem a significância das correlações encontradas. Isto ocorre devido às variações ambientais que surgem no desenvolvimento das árvores e não podem ser desconsiderados, quando se tenta explicar tais relações (AUBERT; OLIVEIRA-FILHO, 1994; SILVA-JÚNIOR, 1998).

O teste de significância de Monte Carlo foi significativo a 5% de probabilidade para o primeiro eixo de ordenação, indicando que os nutrientes do *Eucalyptus* estão significativamente correlacionados às variáveis químicas dos solos analisados (Tabela 29).

Tabela 29 – Correlação entre as variáveis do solo, foliar e dendrométricas nos três primeiros eixos de ordenação e a significância do teste de Monte Carlo

Eixos	Correlação				
	Solo-Análise foliar	Méd.	Mín.	Máx.	p
1	0,929	0,825	0,541	0,963	0,047
2	0,833	0,763	0,496	0,965	
3	0,456	0,698	0,423	0,943	
Eixos	Correlação				
	Solo-Variáveis dendrométricas	Méd.	Mín.	Máx.	p
1	0,867	0,897	0,521	0,999	0,737
2	0,853	0,845	0,431	0,998	
3	0,970	0,807	0,367	0,999	

Legenda: Méd: Média; Mín: Mínimo; Máx: Máximo; p: Probabilidade do Teste de Monte Carlo, com 5% de significância. Fonte: Autoria própria (2021)

Para a segunda análise, observa-se que o teste de Monte Carlo não foi significativo a 5% de probabilidade para o primeiro eixo de ordenação ($p=0,737$),

indicando que os atributos químicos dos solos avaliados nos talhões, não estão correlacionados com as variáveis dendrométricas do eucalipto (Tabela 29).

De maneira geral, as observações entre as variáveis químicas do solo e dendrométricas do eucalipto não apresentaram interações significativas, indicando que os elementos não estão em níveis limitantes ao crescimento do eucalipto.

Esse resultado assemelha-se ao encontrado por Matos *et al.* (2012), os quais observaram poucas correlações estatisticamente significativas entre a fertilidade do solo e o desenvolvimento inicial do eucalipto.

As ordenações das variáveis do solo, das análises foliares e dendrométricas em seus respectivos talhões com eucalipto estão representadas no diagrama de ordenação (“*biplots*”) na Figura 5 e 6.

Na figura 5 observa-se, no lado esquerdo do gráfico, que a ordenação dos talhões de eucalipto no primeiro eixo sugere claramente a existência de uma forte relação do Ca do solo com o teor de Zn nas folhas do eucalipto nos talhões 18 e 6 da área 2, e do Mg do solo com teores de K e N das folhas no talhão 23.

Os resultados demonstram que a prática de calagem pré-plantio em rotações anteriores pode ter influenciado na disponibilidade de Ca e Mg, possibilitando uma maior eficiência na absorção do nutriente para suprir as necessidades nutricionais do eucalipto (MATOS *et al.*, 2012).

Considerando o fato de que, com um aumento da disponibilidade de Ca e Mg no solo, conseqüentemente eleva-se também o valor da soma de bases trocáveis do solo, efeito este que possibilita maior disponibilidade de nutrientes na solução do solo para as árvores. Desta forma, com a predominância de Ca e Mg no solo haverá uma melhor resposta no desenvolvimento do eucalipto em altura e diâmetro (LIMA *et al.*, 2017b), além de, indiretamente, tal fato também influenciar na disponibilidade de outros nutrientes, como por exemplo o N e micronutrientes, tendo em vista a diminuição da acidez e a maior mineralização da MOS.

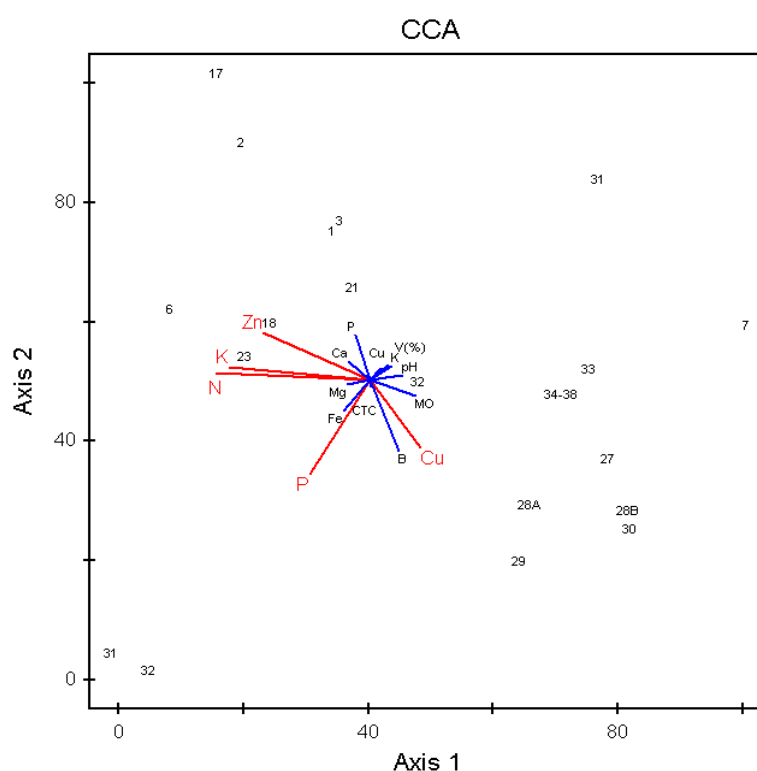
Este melhor desenvolvimento do eucalipto, conforme Bellote e Ferreira (1995), ocorre devido a importância do magnésio na formação da clorofila, síntese de proteínas e equilíbrio entre cátions e ânions. Da mesma forma, o cálcio é essencial na sinalização, composição e desenvolvimento celular (BELLOTE; FERREIRA, 1995).

No segundo eixo, no sentido vertical inferior, verifica-se que houve uma relação de Fe e CTC do solo com teores de P nas folhas dos talhões 31 e 32 e do B

do solo com os teores de Cu nas folhas do eucalipto nos talhões 27, 28A, 28B, 29 e 30, na área 1 (Figura 5).

Observa-se, também, pelo gráfico (Figura 5), que os talhões (1, 2, 3, 17, 21 e 33) da área 2, com solos ricos em P, Cu, K, V(%) e pH, e os talhões (7, 33 e 34-38) da área 1, com solos ricos em MO e Fe, não mostraram relação com os nutrientes foliares do eucalipto.

Figura 5 - Diagrama de ordenação dos dois primeiros eixos CCA para as variáveis do solo (azul) e as variáveis foliares (vermelho) dos talhões com eucalipto nas áreas 1 e 2



Fonte: Autoria própria (2021)

Verifica-se, na Figura 6, que a ordenação dos talhões com eucalipto, no primeiro eixo sugere claramente a existência de uma pequena relação do Ca, Mg e CTC do solo no crescimento em DAP e HT; e, com isso, no volume individual das árvores.

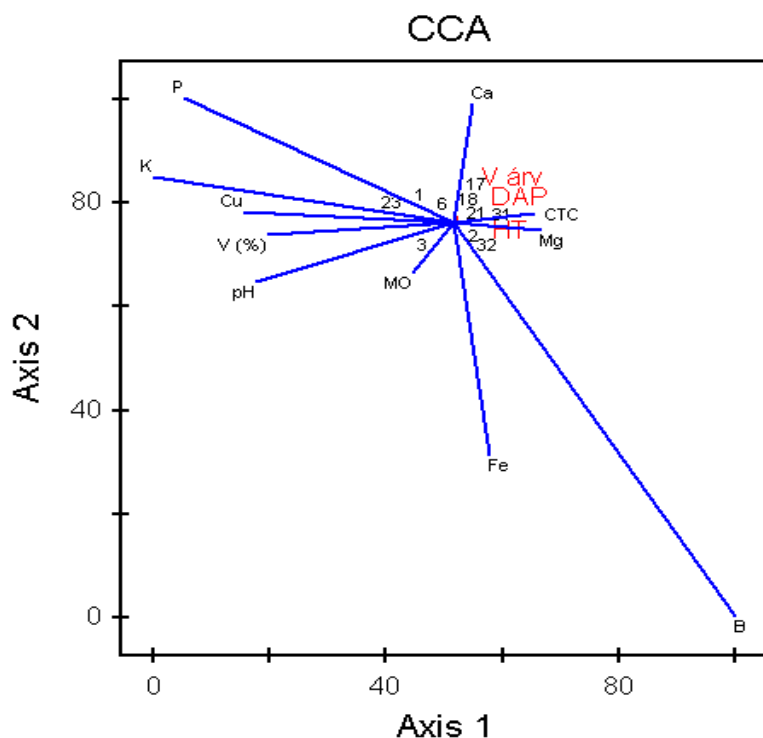
Ao verificar as limitações químicas ao crescimento inicial do eucalipto em solos arenosos do Pampa gaúcho, Guimarães *et al.* (2015) observaram que os atributos químicos do solo que apresentaram maior correlação com as variáveis de crescimento do eucalipto foram o teor de magnésio trocável, saturação por alumínio

e saturação por bases, destacando que estes foram os principais limitantes químicos das áreas avaliadas.

Ainda, de acordo com o trabalho dos autores, a adequação dos teores destes elementos à necessidade da espécie poderia elevar os ganhos em crescimento (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

Nos talhões (2, 17, 18, 21, 31 e 32), conforme observado no lado direito do gráfico de ordenação (Figura 6), as curtas linhas vermelhas no gráfico mostram um gradiente muito pequeno, indicando a baixa relação entre os elementos do solo e o crescimento das árvores de *Eucalyptus*, comprovado pelo valor alto de p ($=0,737$).

Figura 6 - Diagrama de ordenação dos dois primeiros eixos CCA para as variáveis do solo (azul) e as variáveis dendrométricas (vermelho) dos talhões com eucalipto nas áreas 1 e 2



6 CONCLUSÕES

Pode-se concluir, que os solos das áreas avaliadas reúnem boas condições para o pleno desenvolvimento dos plantios de *Eucalyptus* sp. na região Sudoeste do Paraná.

Todavia, apenas a área 4 localizada, apresentou uma menor fertilidade do solo, as demais áreas apresentaram uma maior fertilidade quanto a indicadores como MO, V%, P, K, Ca, Mg.

Os atributos químicos do solo que mais correlacionaram com os nutrientes foliares do eucalipto foram P, Mg, pH e Cu com os atributos foliares de N, K, Ca, Na e Al.

As variáveis dendrométricas do eucalipto que mais se correlacionaram com os atributos químicos do solo foram DAP, HT, HDOM e Vcc (m³/ha) com P, K, Ca, Mg, MOS, pH, CTC, V%, Fe e Cu.

Os nutrientes foliares mais correlacionados com as variáveis dendrométricas do eucalipto foram B, Fe e Zn com DAP, HT, HDOM e Vcc (m³/ha).

Na Análise dos Componentes Principais (ACP) as variáveis que mais influenciaram na classificação foram o P, MOS, pH e V%, sendo os atributos que mais caracterizam a fertilidade dos solos das áreas 1, 2 e 3.

Na Análise Discriminante, foram selecionadas seis variáveis do solo com poder de discriminação das áreas 1, 2 e 3, sendo elas, CTC, pH, V(%), Cu, Fe e B.

A Análise de Correspondência Canônica (CCA) observou relação entre Fe e CTC do solo com teores de P nas folhas, e do B do solo com os teores de Cu nas folhas do eucalipto na área 1. Na área 2 ocorreu uma forte relação entre o Ca do solo com o teor de Zn das folhas, e do Mg do solo com teores de K e N das folhas do eucalipto. Quanto aos atributos do solo MO e Fe na área 1 e, P, Cu, K, V(%) e pH na área 2, não mostraram relação com os nutrientes foliares do eucalipto.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prática adequada de manejo é essencial para a produção florestal e para evitar a degradação do solo e promover melhorias no estabelecimento e no desenvolvimento das florestas plantadas.

Os estudos que unem a avaliação da qualidade do solo, da nutrição e do crescimento dos plantios florestais devem ser monitorados a longo prazo, pois tanto o solo quanto o desenvolvimento das espécies necessitam de um tempo maior para demonstrar os efeitos destes na produtividade dos plantios de eucalipto.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que as áreas avaliadas são diferentes quanto às propriedades químicas do solo, assim, antes de qualquer intervenção na área, recomenda-se fazer um levantamento exploratório das condições estruturais do solo e do material genético plantado, pois este deve ser específico para cada área.

Desta forma, o monitoramento destas áreas a longo prazo antes e após a instalação dos plantios de eucalipto, avaliando a qualidade do solo, a nutrição e o desenvolvimento das espécies são importantes para práticas silviculturais, como adubações adequadas que visam aumentar a produção da cultura do *Eucalyptus* na região Sudoeste do Paraná.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A *et al.* Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 799-806, 2003.
- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E.A.V.; MAFIA, R.G.; ASSIS, T.F. **Clonagem e doenças do Eucalipto**. 2. ed. Minas Gerais: UFV, 2009.
- ALVARES, C. A. *et al.* Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B. & LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.
- ARAÚJO, A.P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. *In*: FERNANDES, M.S., ed. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 253-280.
- ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. Melhoramento Genético do Eucalipto. *In*: SCHUMACHER, M. V.; VIEIRA, M., ed. **Silvicultura do Eucalipto no Brasil**. Santa Maria, RS: UFSM, 2015. cap. 7. p 217-244.
- ASSUNÇÃO, S. A *et al.* Influence of parent material on organic phosphorus fractions in vineyard soils in Santa Catarina, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 5, p. 1-13, 2020.
- AUBERT, E.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Análise multivariada da estrutura fitossociológica do sub-bosque de plantios experimentais de *Eucalytus* spp. e *Pinus* spp. em Lavras (MG). **Revista Árvore**, v. 18, n. 3, p. 194-214, 1994.
- ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS. FLORESTAL (APRE). **Estudo Setorial 2020**. Curitiba: APRE, 2020. 92 p. Disponível em: <<https://apreflorestas.com.br/publicacoes/estudo-setorial-apre-2020/>>. Acesso em: 03 de dez. de 2020.
- ARTUR, A. G. *et al.* Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141-149, 2014.
- BAYER, C.; BISSANI, C. A; ZANATTA, J. A. Química de solos em plantio direto. *In*: FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C., Org. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava, PR: FAPA, 2006. p. 7-30.
- BARNEY JR., P. E; BUSH, L. P. Interaction of nitrate and sulfate reduction in tobacco. I. Influence of availability of nitrate and sulfate. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 8, n. 6, p. 505-515. 1985.

- BASSO, L. H. M *et al.* Efeito do alumínio no crescimento de brotações de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivadas in vitro. **Scientia Forestalis**, São Paulo, n. 13, p. 167-177, jun. 2003.
- BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Fertilidade de solos, nutrientes e produção florestal. **Revista Visão Agrícola**, São Paulo, n. 4, p. 76-79, dez. 2005.
- BARROS, N. F., NOVAIS, R. F., NEVES, J. C. L. Fertilização e correção do solo para plantio de eucalipto. *In*: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F., eds. **Relação Solo-Eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European journal of soil science**, v. 47, n. 2, p. 151-163, 1996.
- BELTRAME, R *et al.* Tensões de crescimento longitudinais e propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. **Revista Madeira**, v. 1061, p. 1074, 2015.
- BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. *In*: GONÇALVES, L. M.; BENEDETTI, V., ed. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 105-133.
- BELLOTE, A.F. J; SILVA, H. D. Nutrição e crescimento de plantações de *Eucalyptus*. *In*: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZAÇÃO E NUTRIÇÃO FLORESTAL. 1999, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: IPEF, 1999.
- BELLOTE, A. F. J. ; FERREIRA, C. A. Nutrientes minerais e crescimento de árvores adubadas de *Eucalyptus grandis*, na região do cerrado, no estado de São Paulo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 26/27, p. 17-28, dez. 1995.
- BRACCINI, M. C. L. *et al.* Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. II. Teores de P, Ca e Al e eficiência ao P e Ca. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 22, n. 3, p. 443-450, 1998.
- BERGER, R. **Crescimento e qualidade da Madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.
- BEALE, S I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis. **Photosynthesis research**, v. 60, n. 1, p. 43-73, 1999.
- BONFERRONI, C. Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilita. **Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze**, v. 8, p. 3-62, 1936.
- BRISOLAL, S. H; DEMARCO, D. Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis* x *urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 91, p. 317-330, 2011.

BREMNER, J. M. MULVANEY, C. S. Nitrogen-Total. **Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties**. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624, 1982.

CAMARGO, M. L. P *et al.* Considerações sobre eficiência nutricional em *Eucalyptus*. **Científica**, v. 32, n. 2, p. 191-196, 2008.

CAMARGO, P. N. **Princípios de nutrição foliar**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1970.

CASTRO, C. A. O; RESENDE, R. T; BHERING, L. L; CRUZ, C. D. Brief history of *Eucalyptus* breeding in Brazil under perspective of biometric advances. **Ciência Rural**, v. 46, n. 9, p. 1585-1593, 2016.

CASSOL, C. J. **Determinação de íons metálicos disponíveis e parâmetros físico-químicos em solos com cobertura vegetal natural do oeste do Paraná**. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

COELHO, C. C *et al.* Gestão estratégica para o desenvolvimento sustentável de florestas plantadas-estudo aplicado em Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 22, n. 1, p. 67-79, 2021.

COSTA, A. R. **Nutrição mineral em plantas vasculares**. Portugal: Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora, 2014.

CYAMWESHI, R. A *et al.* Enhancing nutrient availability and coffee yield on acid soils of the central plateau of southern Rwanda. **Global journal of Agricultural Research**, v. 2, n. 2, p. 44-55, 2014.

CUNHA, F. V. N *et al.* Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba-MG. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 13-24, 2018.

CUNHA, G. M; GAMA-RODRIGUES, A. C; COSTA, G. S. Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. **Revista Árvore**, v. 29, p. 353-363, 2005.

DANNEL, F; PFEFFER, H; RÖMHELD, V. Compartmentation of boron in roots and leaves of sunflower as affected by boron supply. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, n. 5-6, p. 615-622, 1998.

DALPOSSO, D. M. **Atributos do solo e dendrometria em agrofloresta no Sudoeste do Paraná**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Programa de Pós- Graduação em Agroecossistema, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2017.

DECHEN, A. R; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.;

CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. ed. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. III. p. 91-132.

DIAS, L. P. R *et al.* Substituição parcial de fosfato solúvel por natural na implantação de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus dunnii* no planalto sul catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 516-523, 2014.

DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. **Technometrics**, v. 6, n. 3, p. 241-252, 1964.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. Disponível em:<<https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00083136.pdf>>. Acesso em: 05. Jun. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. p. 531, Brasília, DF, 2018. Disponível em:< <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>>. Acesso: 18. mar.2021.

ENDERS, C. K. **Applied missing data analysis**. 72. ed. New York: Guilford press 2010.

EPSTEIN, E; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006.

EPSTEIN, E; BLOOM A. J. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. New York, 2004.

EPSTEIN, E. **Nutrição Mineral de Plantas: princípios e perspectivas**: São Paulo: EDUSP, 1975.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA / FAEPE, 2005.

FERREIRA, D. H. A. A *et al.* Crescimento e produção de eucalipto na região do Médio Paraíba do Sul, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-9, 2017.

FERREIRA, F. A. S. **A interação nitrato, fosfato e sulfato na absorção de fosfato e de sulfato no crescimento de eucalipto e no seu metabolismo de nitrato e sulfato**. 1986. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

FERNÁNDEZ, M *et al.* *Eucalyptus x urograndis* biomass production for energy purposes exposed to a Mediterranean climate under different irrigation and fertilisation regimes. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 22-30, 2018.

FIELD, A. **Descobrimos a estatística usando o SPSS**. 2. ed. São Paulo: Artmed, 2009.

FOLTRAN, E. C *et al.* Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 170-179, 2019.

FRANÇA, J. S *et al.* Subsoiling and mechanical hole-drilling tillage effects on soil physical properties and initial growth of eucalyptus after eucalyptus on steeplands. **Soil and Tillage Research**, v. 207, p. 1-15, 2021.

FREITAS, L *et al.* Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias - Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 57, n. 3, p. 224-233, 2014.

GARCIA, M *et al.* Effect of various potassium-calcium ratios on cation nutrition of grape grown hydroponically. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 417-425, 1999.

GODINHO, T. O. **Fertilidade e frações de fósforo em solos sob povoamentos mono-específicos e mistos de *Eucalyptus* e *Acacia mangium***. Tese (Doutorado em Ciências - Recursos Florestais) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2015.

GONCALVES, J. L. M *et al.* 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 *et al.* Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*, com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 94, p. 187-201, 2012.

GONÇALVES, J. L. M. Fertilização de plantação de eucalipto. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, v. 2. 2011, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011. p 85-113.

GONÇALVES, J. L.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. 427 p.

GONÇALVES, J. L. M. Principais solos usados para plantações florestais. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.

GONÇALVES, J. L. M; RAIJ, B; GONÇALVES, J. C. Florestais. *In*: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. ed. **Boletim Técnico nº 100**. 2. ed. Campinas: IAC/FUNDAG, 1997. cap. 23, p. 245-258.

GONÇALVES, J. L. M.; RAIJ, B. van; GONÇALVES, J. C. Florestais. *In*: _____. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundação IAC, 1996. p. 247-259. (Boletim técnico, 100).

GONÇALVES, J. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, pinus e espécies típicas da Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, v. 15. p. 1-23. 1995.

GOODMAN, B. A. The characterization of iron complexes with soil organic matter. *In*: STUCKI, J. W.; GOODMAN, A.; SCHWERTMANN, U., ed. **Iron in soils and clay minerals**. Springer: Advanced Study Institute, 1988. p. 677-687.

GOSNELL, J. M.; LONG, A. C. Some factors affecting foliar analysis in sugarcane. *In*: **South Afr. Sugar Tech. Assoc. 45. Proceedings. Natal, Witness**, 1971, p. 217-22.

GUEDES, M. C *et al.* Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006.

GUIMARÃES, C. C; FLORIANO, E. P.; VIEIRA, F. C. B. Limitações químicas ao crescimento inicial de *Eucalyptus saligna* em solos arenosos do Pampa Gaúcho: estudo de caso. **Ciência Rural**, v. 45, n. 7, p. 1183-1190, 2015.

GUERINOT, M. L; YI, Y. Iron: nutritious, noxious and not readily available. **Plant Physiology**, v. 104, n. 3, p. 815, 1994.

GUPTA, U. C. Boron nutrition of crops. **Advances in agronomy**, v. 31, p. 273-307, 1980.

HAIR, A.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise Multivariada de dados**. Porto Alegre: Artmed, 2005.

HOTELLING, H. Relations between two sets of variates. *In*: **Breakthroughs in statistics**. New York, NY, 1992, p. 162-190.

IBM SPSS. **Corporation Statistics for Windows, Versão 20.0**. Armonk, NY: IBM Corp. 2011.

INOCENCIO, M. F *et al.* Potássio, sódio e crescimento inicial de espécies florestais sob substituição de potássio por sódio. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 113-123, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/dois-vizinhos/panorama>>. Acesso em: 28 out. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS**. 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf>. Acesso em 24 de novembro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário**. 2017. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=73096>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico de pedologia**. 3ª edição, Rio de Janeiro: IBGE, 428 p., 2015. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv95017.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, n. 1, 2012. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). **Relatório Anual 2020**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em 28 de jan. de 2020.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Caderno Estatístico Município de Cruzeiro do Iguaçu**. 2021. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85598&btOk=ok>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Caderno Estatístico Município de Dois Vizinhos**. IPARDES: 2021. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85590&btOk=ok>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Caderno Estatístico Município de Francisco Beltrão**. 2021. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85600&btOk=ok>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Caderno Estatístico Município de Nova Esperança do Sudoeste**. 2021. Disponível em: <<http://www.ipardes.gov.br/cadernos/MontaCadPdf1.php?Municipio=85635&btOk=ok>>. Acesso em: 29 jan. 2021.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Sudoeste paranaense: especificidades e diversidades**. 2009. Disponível em: <http://www.ipardes.pr.gov.br/sites/ipardes/arquivos_restritos/files/documento/2019-09/Sudoeste%20Paranaense_especificidades%20e%20diversidades_2009.pdf>. Acesso em: 28 out. 2020.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). **Leituras regionais: Mesorregião Geográfica Sudoeste Paranaense**.

Curitiba, 139p. 2004. Disponível em: <
http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/leituras_reg_meso_sudoeste.pdf>. Acesso em: 28 out. 2020.

ISMAEL, J. J *et al.* Níveis críticos de fósforo no solo e nas folhas para a implantação de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, em quatro tipos de solos. **Scientia Forestalis**, n.54, p. 29-40, 1998.

JONES, J.B. JR. **Plant nutrition and soil fertility manual**. Second edition. p. 282. 2012.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 816 p. 1998.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**: 3.ed. New Jersey: Prentice-Hall. 794 p. 1992.

KERBAUY, G. B. A. **Fisiologia Vegetal**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 432 p. 2008.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual review plant physiology and plant molecular biology**, v.46, p.237- 260. 1995.

KÖGEL-KNABNER, I; AMELUNG, W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. **Geoderma**, v. 384, p. 114785, 2021.

KLUG, I *et al.* Atributos químicos do solo em plantios florestais em substituição à vegetação nativa em campos de altitude. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 279-290, 2020.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952.

LATTIN, J; CARROLL, J. D; GREEN, P. E. **Análise de Dados Multivariados**. São Paulo: Cengage Learning, 455p. 2011.

LACLAU, J. P *et al.* Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in plant science**, v. 4, p. 243, 2013.

LEITA, L *et al.* Influence of inorganic and organic fertilization on soil microbial biomass, metabolic quotient and heavy metal bioavailability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, n. 4, p. 371–376, 1999.

LI, N *et al.* Determining optimal digital soil mapping components for exchangeable calcium and magnesium across a sugarcane field. **Catena**, v. 181, p. 104054, 2019.

LIMA, E. S *et al.* Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017a.

LIMA, E. S *et al.* Classification of the initial development of eucaliptus using data mining techniques. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 201-208, 2017b.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley and Sons Ltd, 449p.1979.

MAEDA, S.; BOGNOLA, I. A.; ANDRADE, G. C. Caracterização físico-química de solos da região dos Campos Gerais, Paraná, submetidos à aplicação de lama de cal. **Embrapa Florestas-Documents (INFOTECA-E)**, Colombo: Embrapa Florestas, 2011. Disponível em:
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/898076/1/Doc217.pdf>
> Acesso em: 28 mai. 2021.

MATOS, G. S. B *et al.* Desenvolvimento inicial e estado nutricional de clones de eucalipto no nordeste do Pará. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 4, p. 491-500, 2012.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, p. 631. 2006.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estudo nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 319 p.1997.

MALAVOLTA, E. Nutrição Mineral das Plantas. *In*: FERNANDES, F. M; NASCIMENTO, V. M. **Curso de Atualização em Fertilidade do Solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 209-246.

MALAVOLTA, E. Nutrição mineral. *In*: FERRI, M. G. ed. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1985. p. 97-116.

MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de Marketing: Uma Orientação Aplicada**.4. ed. Porto Alegre: Bookman Editora,720.p. 2006.

MANCIN, C. R *et al.* **Matéria orgânica e formas de alumínio em um latossolo vermelho distroférrico sob sistema plantio direto consolidado**. 2010. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Mato Grosso do Sul. 2010

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. Ed. San Diego: Academic Press, 2011. 651 p.

- MARTINS, J. R.; KAMINSKI, J. Estudo da interação entre fósforo e enxofre em capim-colônião (*Panicum maximum* Jacq. cv K 249) cultivado em solos do noroeste do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro: SBCS/EMBRAPA, 1997.
- MATTIELLO, E. M *et al.* Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1281-1290, 2009.
- MENDES, H. S. J *et al.* Physiological responses of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* genotypes to water availability and potassium fertilization. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 603-611, 2013.
- MENDES, A. D. R *et al.* Concentração e redistribuição de nutrientes minerais nos diferentes estádios foliares de seringueira. **Acta amazônica**, v. 42, n. 4, p. 525-532, 2012.
- MÜLLER, D. H *et al.* Spatial variability in soybean seeds quality and in chemical attributes of the soil of a production field in the Brazilian Cerrado. **Journal of Seed Science**, v. 40, n. 1, p. 25-35, 2018.
- MINEROPAR. **Atlas geomorfológico do estado do Paraná escala 1:250.000 modelos reduzidos**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 63p. 2006. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-04/atlas_geomorforlogico_parana_2006.pdf>. Acesso em: 29 out. 2020.
- MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, JMAS. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. 2009. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/docs/Boletim_Tecnico_106_rev_atual_2009.pdf> Acesso em: 05. Jun. 2021.
- MORALES, B. P. **Atributos do solo e produtividade de *Eucalyptus* spp. na metade sul do Rio Grande Do Sul**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- MCCMAHON, D. E *et al.* Soil nutrient stocks are maintained over multiple rotations in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 448, p. 364-375, 2019.
- MCCUNE, B.; MEFFORD, M. J. **PC-ORD version 6: multivariate analysis of ecological data**. Glenden Beach: MjM, 2011.
- NABLE, R. O; BAÑUELOS, G. S; PAULL, J. G. Boron toxicity. **Plant and soil**, v. 193, n. 1, p. 181-198, 1997.
- NAPPO, M. E.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; MARTINS, S. V. A estrutura do sub-bosque de povoamentos homogêneos de *Mimosa scabrella* Benthams, em área minerada, em Poços de Caldas, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 17-29, 2000.

NEVES, J. C. L.; GOMES, J. M.; NOVAIS, R. F. Fertilização mineral de mudas de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p.100-124.

NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F. Efeito do alumínio em solução nutritiva sobre o crescimento e a absorção de nutrientes por *Eucalyptus* spp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 6, p. 1-16, 1982.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 471-550. 2007.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Nutrição mineral de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS R. F., eds. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, Folha de Viçosa, 1990. v 1, p. 25-98.

NOVAIS, R. F.; REGO, A. K.; GOMES, J. M. Nível crítico de potássio no solo e na planta para o crescimento de mudas de *E. grandis* W. Hill ex-Maiden e de *E. cloeziana* F. Muell. **Revista Árvore**, v.4, n.1, p.14-23, 1980.

NETO, F. V. C da *et al.* Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba-MG. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 13-24, 2018.

OERTLI, J. J.; RICHARDSON, W. F. The mechanism of boron immobility in plants. **Plant Physiol.**, v. 23, p. 108-116, 1970.

OLIVEIRA, S. A.; MORAES, M. L. T.; BUZETTI, S. Efeito da aplicação de NPK e micronutrientes no desenvolvimento de *Eucalyptus citriodora* Hook. **Floresta**, v. 29, n. 1/2, 1999.

PAES, F. A. S. V *et al.* Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1081-1090, 2013.

PEREIRA, A. P. A *et al.* Mixed *Eucalyptus* plantations induce changes in microbial communities and increase biological functions in the soil and litter layers. **Forest ecology and management**, v. 433, p. 332-342, 2019.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretações de análise de solo e foliar**. Vitória, ES: Incaper, 104 p. 2013. Disponível em:< <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/40/1/Guia-interpretacao-analise-solo.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2021.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 317–326, 2012.

PULROLNIK, K *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009.

RIAZ, M *et al.* Mechanisms of organic acids and boron induced tolerance of aluminum toxicity: a review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 165, p. 25-35, 2018.

RAMOS, S. J *et al.* Biomass production, B accumulation and Ca/B ratio in *Eucalyptus* under various conditions of water availability and B doses. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 289-295, 2013.

RAVEN, J. A. Short-and long-distance transport of boric acid in plants. **New Phytologist**, v. 84, n. 2, p. 231-249, 1980.

RHODES, R; MILES, N; HUGHES, J. C. Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa. **Field Crops Research**, v. 223, p. 1-11, 2018.

ROCHA, J. H. T *et al.* Growth dynamics and productivity of an *Eucalyptus grandis* plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. **Forest Ecology and Management**, v. 447, p. 158-168, 2019a.

ROCHA, J. H. T.; DU TOIT, B.; GONCALVES, J. L. M. Ca and Mg nutrition and its application in Eucalyptus and Pinus plantations. **Forest ecology and management**, v. 442, p. 63-78, 2019b.

ROCHA, J. H. T. **Manejo de resíduos florestais e deficiência nutricional em duas rotações de cultivo de eucalipto**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

ROCHA, J. H. T *et al.* Reflorestamento e recuperação de atributos químicos e físicos do solo. **Floresta e ambiente**, v. 22, n. 3, p. 299-306, 2015a.

ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. de M.; GODINHO, T. de O.; SOUZA FILHO, L. F. da S. Nutrição e fertilização com enxofre e uso de gesso em plantações de eucalipto. Piracicaba, SP: Instituto de Estudo e pesquisas Florestais, 2015. 14 p. (IPEF. Circular Técnica, 208).

ROCHA, J. H. T *et al.* Produção e desenvolvimento de mudas de eucalipto em função de doses de fósforo. **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 535-543, 2013.

ROCHA, J. B. O *et al.* Efeito da calagem na nutrição mineral e no crescimento inicial do eucalipto a campo em Latossolo húmico da Zona da Mata (MG). **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 80, p. 255-263, 2008.

RODRIGUES, F. A. V *et al.* Produtividade de eucalipto aos 18 meses de idade, na região do Cerrado, em resposta à aplicação de cálcio, via calcário e gesso agrícola. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 67-74, 2016.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Embrapa Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, p. 26, 2010. Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2020.

ROY, A. K.; SHARMA, A.; TALUKDER, G. Some aspects of aluminum toxicity in plants. **The botanical review**, v.54, n.2, p.145-178, 1988.

ROSA, S. F *et al.* Propriedades físicas e químicas de um Argissolo sob cultivo de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 580-590, 2018.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 12, p. 1443-1448, 1984.

RIBAS, J. H. R.; VIEIRA, P. R. da C. **Análise Multivariada com o uso do SPSS**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 272p. 2011.

SÁ, A. F. L de *et al.* Effects of potassium application and soil moisture on the growth of *Corymbia citriodora* plants. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 645-651, 2014.

SAHRAWAT, K. L. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1471-1504, 2005.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução de solo no sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**. Cruz Alta, n. 1, p. 9-13, 1999.

SALVADOR, S. M.; CONSENSA, C. B.; ARAÚJO, E. F. Produção de serapilheira e devolução de macronutrientes em um povoamento de *Eucalyptus saligna* (F. Muell). **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 2, n. 2, p. 52-62, 2014.

SANTOS, R. A. Território e modernização da agricultura no Sudoeste do Paraná. **Revista Espaço Acadêmico**, v. 10, n. 118, p. 114-122, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/EspacoAcademico/article/download/11732/6709/0>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SANTOS, H. G *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em:< <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>>. Acesso em: 15 out. 2020.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; GONÇALVES, A. N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 80-104.

SILVEIRA, R. L. V. A.; MOREIRA, A.; HIGASHI, E. N. Crescimento e sobrevivência de mudas de eucalipto sob doses de boro cultivadas em condições de viveiro e de campo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 2, p. 366-371, 2004.

SILVA, M. O *et al.* Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SILVA, E. R. O *et al.* Effects Of Spatial Variability Of Soil Chemical Parameters On Tifton 85 Grass Yield1. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 1, p. 236-245, 2020.

SILVA, V. E *et al.* Consequences of soil attributes on the productivity and eucalypt drought response in two climate types in Brazil. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 117-134, 2020.

SILVA, V. E *et al.* Produtividade de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e suas relações com atributos químicos dos solos em região de Cerrado brasileiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 292-306, 2019.

SILVA, D. E. M.; AZEVEDO, L. A. S.; POLTRONIERI, T. P. S. Avaliação da resistência de espécies de eucalipto à ferrugem (*Puccinia psidii* Winter). **Summa Phytopathologica**, v. 40, n. 1, p. 54-62, 2014.

SILVA, C. A. J.; BOECHAT, C. L.; CARVALHO, L. Atributos químicos do solo sob conversão de floresta amazônica para diferentes sistemas na região norte do Pará, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, p. 566-572, 2012.

SILVA, L. F. N *et al.* Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1873-1881, 2008.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. M. **Biologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 291 p. 2002.

SIMONETE, M. A *et al.* Fornecimento de cálcio para plantas de *Eucalyptus saligna* por meio de aplicação de resíduo industrial lama de cal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1343-1351, 2013.

SILVA-JÚNIOR, M. C. Comunidades de árvores e sua relação com os solos na Mata do Pitoco, reserva ecológica do IBGE, Brasília – DF. **Revista Árvore**, v. 22, n. 1, p. 29-40, 1998.

GUIA PRÁTICO PARA INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISES DE SOLOS. SOBRAL, L. F *et al.* (Ed.). **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documentos (INFOTECA-E)**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 15 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 206). Disponível em: <

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>
>. Acesso em: 29 out. 2020.

SOUZA, I. F *et al.* Decomposition of eucalypt harvest residues as affected by management practices, climate and soil properties across southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 374, p. 186-194, 2016.

SOUZA, G. S *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 4, p. 589-596, 2008.

SOUZA, A. D; VICINI, L. **Análise Multivariada: da teoria à prática**. Santa Maria: UFSM – Departamento de Estatística, 213 p. 2005.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO (SBCS). Núcleo Estadual do Paraná (NEPAR). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, p.482. 2017.

SPANGENBERG, A. *et al.* Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in Eastern Amazonia (Jari). **Forest ecology and management**, v. 80, n. 1-3, p. 225-234, 1996.

SPEARMAN, C. The Proof and Measurement of Association Between Two Things. *In* JENKINS. J. J.; PATERSON. D. G. (Eds.), **Studies in individual differences: The search for intelligence**. Appleton-Century-Crofts. 1961. p. 45-58.

SCHUMACHER, M. V *et al.* Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 144-156, 2019.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCHWERTMANN, U. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant and soil**, v. 130, n. 1, p. 1-25, 1991.

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. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

UCHÔA, S. C. P.; VÍCTOR, HUGO, A. V.; FREITAS, F, M. Doses de enxofre e tempo de incubação na dinâmica de formas de enxofre no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 678-687, 2013.

TAIZ. L.; ZEIGER E. **Plant Physiology**. 5. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

TAVARES, L. S *et al.* Análise multivariada de espécies florestais nativas em relação aos atributos químicos e texturais do solo na região de Cotriguaçu-MT. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 281-291, 2019.

TER BRAK, C. J. F.; PRENTICE, I. C. A theory of Gradient Analysis. **Advances in Ecological Research**, v. 18, n. 2, p. 271-317, 1988.

TER BRAAK, C. J. F. The analysis of vegetation environment relationship by canonical correspondence analysis. **Vegetatio**, v. 69, n. 1/3, p. 69-77, Apr. 1987.

TER BRAK, C. J. F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. **Ecology**, v. 67, n. 5, p. 1167-1179, 1986.

TER BRAAK, C. J. F. Ordination. *In*: JONGMAN, R. H. G.; BRAAK, C. J. F.; TONGEREN, O. F. R. van (Eds.). **Data analysis in community and landscape ecology**. Cambridge: Cambridge University, 1995. p. 91-173.

VANDERLEI, J. C.; FAQUIN, V.; GUEDES, G. A. A.; CURI, N. Boro em materiais de três solos do município de Lavras, MG. **Separata de Pesquisa agropecuária Brasileira**, v.23, n.12, p.1421-9, 1988.

VILELA, H *et al.* Influência do uso de nitrato de magnésio e potássio (NMK) no crescimento de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e cedro australiano (*Toona ciliata*). **Veterinária Notícias**, v. 16, n. 1, 2010.

VILLAR, M. L. P. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. Cuiabá: EMPAER-MT, 2007. 182 p. (EMPAER-MT, Série Documentos, 35). Disponível em: < <http://www.empaer.mt.gov.br/-/10860471-diretor-da-empaer-disponibilizaversao-digital-do-manual-de-interpretacao-de-analise-de-plantas-e-solos>>. Acesso em: 29 out. 2020.

WOICIECHOWSKI, T *et al.* Nutrientes e umidade do solo após a incorporação de biocarvão em um plantio de *Eucalyptus benthamii*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1455-1464, 2018.

ZARAFSHAR, M *et al.* Do tree plantations or cultivated fields have the same ability to maintain soil quality as natural forests? **Applied Soil Ecology**, v. 151, p. 103536, 2020.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 843-852, 2004.