



FRANCISCO HÉLCIO CANUTO AMARAL

**COMPARTIMENTOS DE K, Ca E Mg EM
SOLOS E SUA RELAÇÃO COM O
CRESCIMENTO INICIAL, FISIOLOGIA E
PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO**

LAVRAS – MG

2016

FRANCISCO HÉLCIO CANUTO AMARAL

**COMPARTIMENTOS DE K, Ca E Mg EM SOLOS E SUA RELAÇÃO
COM O CRESCIMENTO INICIAL, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE
DO EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Nilton Curi

Orientador

LAVRAS – MG

2016

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Amaral, Francisco Hélcio Canuto.

Compartimentos de K, Ca e Mg em solos e sua relação com o crescimento inicial, fisiologia e produtividade do eucalipto / Francisco Hélcio Canuto Amaral. – Lavras : UFLA, 2016.

123 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: Nilton Curi.

Bibliografia.

1. Reserva de macronutrientes. 2. Cinética de liberação. 3. Nutrição mineral de eucalipto. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

FRANCISCO HÉLCIO CANUTO AMARAL

**COMPARTIMENTOS DE K, Ca E Mg EM SOLOS E SUA RELAÇÃO
COM O CRESCIMENTO INICIAL, FISILOGIA E PRODUTIVIDADE
DO EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 18 de abril de 2016.

Prof. Dr. Júlio César Azevedo Nóbrega	UFRB
Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto	ITV
Prof. Dr. Guilherme Lopes	UFLA
Prof. Dr. José Marcio de Mello	UFLA

Prof. Dr. Nilton Curi
Orientador

LAVRAS – MG

2016

À minha família, especialmente meu pai Francisco “Doutor”, minha mãe Elenira e meus irmãos, pelo apoio e por me ensinarem que os desafios são a luz que nos guia na jornada pela busca de nossos objetivos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ser a luz que me guia e conduz sempre pelo melhor caminho.

À minha família, especialmente meus pais, Francisco das Chagas Alves Amaral e Francisca Elenira Canuto de Carvalho Amaral, pela compreensão e apoio.

À minha noiva Priscila, pelo amor, compreensão, paciência e parceria concedidos.

Aos meus orientadores Nilton Curi e Antonio Eduardo Furtini Neto, pela orientação, parceria, ensinamentos e amizade.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade concedida.

À CMPC Celulose Riograndense, na pessoa do pesquisador Elias Frank de Araújo, pela parceria e disponibilização dos solos para a realização do estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo auxílio financeiro na condução deste trabalho.

À Universidade Federal do Piauí (UFPI), pela oportunidade de realizar o curso de graduação em Bacharelado em Engenharia Agrônômica e iniciação científica.

Aos estudantes de graduação em Agronomia: Cassiano, Larissa, Cícera e Renato, pelo apoio na condução das análises em laboratório e de experimento em casa de vegetação.

Aos professores da UFPI, em especial ao Júlio César Azevedo Nóbrega, Rafaela Simão Abrahão Nóbrega e Fabrício de Menezes Telo Sampaio pelos ensinamentos, apoio e amizade.

Aos professores do DCS da UFLA: Furtini, Nilton Curi, Alfredão, Faquin, Moacir, Geraldo, Morzart, Douglas, João José, Carlos Alberto, Bebeto, Guilherme Lopes, José Maria, Marcão, Marco Carbone, Fátima, Maria Lígia, Yuri e Marx, pelos ensinamentos.

À Dirce pela paciência, atenção, dedicação e boa vontade no desempenho de suas atividades na secretaria do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Aos técnicos Roberto, Cristina e Lívia, pelo auxílio na realização das análises em laboratório e aos demais servidores do DCS, especialmente ao Pezão.

Aos amigos Elaine, Ferreirinha, Bruno Montoani, Wantuir, Eduardo Cancellier, Gabriel Barbosa, Julian, Geanderson e demais colegas do DCS.

Aos colegas de república Breno, Julian, Vladimir, Guilherme, Raphael e Diego.

Muito obrigado!

“Estabeleça novos desafios, saia da sua zona de conforto, enfrente seus maiores medos. Desse modo a recompensa é só uma consequência”.

Mariana Mello Machado

RESUMO

A silvicultura tem crescido de forma contínua e acelerada no Brasil, constituindo uma atividade estratégica para geração de empregos, de renda e de tributos. Os objetivos deste estudo foram: (1) avaliar os teores de K, Ca e Mg nos compartimentos de reserva, não trocável, trocável, disponível e a velocidade de sua liberação, suas correlações e seus efeitos na produtividade (incremento médio anual – IMA - de madeira) de plantios de eucalipto, em sítios florestais cultivados em solos do Estado do Rio Grande do Sul; (2) avaliar o crescimento inicial, a nutrição e aspectos fisiológicos de plantas de eucalipto cultivadas com e sem a adição de fontes minerais de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), nos mesmos solos acima. No primeiro estudo, foram avaliados os teores de K, Ca e Mg em extratos de digestão sulfúrica, em ácido nítrico fervente, em cloreto de amônio, em Mehlich-1 (apenas K), em cloreto de potássio (Ca e Mg) e também a velocidade de liberação desses nutrientes nos solos. Já no segundo estudo, foram avaliadas, em condições controladas, variáveis de crescimento, aspectos nutricionais, taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração das plantas (E) crescidas em solos distintos. A grande maioria dos compartimentos de K, Ca e Mg apresentam correlações significativas entre si, expressando a dependência que existe entre os mesmos e evidenciando a importância da avaliação dos teores desses nutrientes nos diferentes compartimentos para adequar o manejo nutricional das plantas em cada classe de solo e para obtenção de produções contínuas, minimizando os impactos negativos ao meio ambiente. A produtividade (IMA) de madeira de eucalipto correlacionou-se de forma positiva e significativa com os teores de K, Ca e Mg presentes nos diferentes compartimentos, principalmente entre a reserva e a cinética de liberação de K, Ca e Mg, nas duas profundidades, expressando a importância destes para a produção de árvores plantadas, especialmente para as espécies vegetais de ciclo mais longo, no qual sua liberação a médio e longo prazos se torna importante. Plantas cultivadas em solos que possuem maiores reservas, disponibilidade e cinética de liberação de K, Ca e Mg, apresentaram altura (H), diâmetro de caule (DC) e matéria seca de parte aérea (MSR) similares, com ou sem adubação com K, Ca e Mg. As plantas apresentaram maior teor foliar e acúmulo de K em todos os solos adubados com K, Ca e Mg. No entanto, a eficiência de uso deste nutriente foi superior em plantas cultivadas em solos sem adubação. A adubação com K, Ca e Mg promoveu redução na taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração de plantas cultivadas em solos que possuem menor reserva e disponibilidade destes nutrientes.

Palavras-chave: Reserva de macronutrientes. Cinética de liberação. Atividade florestal. Eucaliptocultura. Nutrição mineral de eucalipto.

ABSTRACT

Forestry has grown continuously and rapidly in Brazil, and it is a strategic activity for generating jobs, income and taxes. The objectives of this study were: (1) to evaluate the contents of K, Ca and Mg in the following compartments, reservoir, non-exchangeable, exchangeable and available, and the speed of their release, their correlations and their effects on productivity (annual average increase IMA -of wood) of eucalyptus plantations in cultivated forest sites in Rio Grande do Sul State; (2) to assess the initial growth, nutrition and physiological aspects of eucalyptus plants, grown with and without the addition of mineral sources of potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in the same above-mentioned soils. In the first study we evaluated the contents of K, Ca and Mg in the extracts of sulfuric acid digestion, boiling nitric acid, ammonium chloride, Mehlich1 (only K), potassium chloride (Ca and Mg), and also the rate of release of these nutrients into the soils. In the second study we evaluated growth variables, nutritional aspects, photosynthetic rate (A) and plant transpiration rate (E) of plants cultivated in different soils. The vast majority of K, Ca and Mg compartments present significant correlations with each other, expressing the dependence between them and highlighting the importance of assessing the levels of these nutrients in different compartments to adjust the nutritional management of plants in each soil class and to obtain continuous production, minimizing negative environmental impacts. Productivity (IMA) of wood of eucalyptus correlated positively and significantly with K, Ca and Mg present in different compartments, especially between the reservoir and the K, Ca and Mg release kinetics at the two depths, expressing the importance of them for the production of planted trees, especially for longer cycle plants, where their release at medium and long terms is important. Plants grown in soils that have larger reservoirs, availability and K, Ca and Mg release kinetics, showed similar height (H), stem diameter (SD) and dry weight of shoot (DWS), with or without fertilization with K, Ca and Mg. Plants presented higher leaf content and accumulation of K in all soils fertilized with K, Ca and Mg. However, this nutrient use efficiency was higher in plants grown in soil without fertilizers. Fertilization with K, Ca and Mg promoted reduction in photosynthetic and plant transpiration rates of plants grown in soils that have lower reservoir and availability of these nutrients.

Key words: Macronutrients reservoir. Kinetics of release. Forestry. Eucalyptus. Mineral nutrition mineral of eucalyptus.

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1

- Figura 1.** Difractogramas de raios-X (DRX) em pó obtidos da fração argila das sete classes (PVd, PVAd, PAd, Cxve, RRd, MTo e RQo) e duas profundidades (0,0 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m) dos solos estudados. Mi - mica, Qz - quartzo, An - anatásio, Fp - feldspato, Cb - cristobalita, Il - ilmenita e Es - esmectita.....49
- Figura 2.** Percentuais de K (A e B), Ca (B e C) e Mg (E e F) nos compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul.....58
- Figura 3.** Dendogramas de similaridade para os teores de K, Ca e Mg nos compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 (A) e de 0,20 – 0,40 m (B) de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul60
- Figura 4.** Distribuição dos compartimentos (A e B) e das classes de solos avaliadas (C e D) pela análise de componentes principais para os teores de K, Ca e Mg nos compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 (A) e de 0,20 –

0,40 m (B) de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul62

SEGUNDA PARTE – ARTIGO 2

- Figura 1.** Difractogramas de raios-X (DRX) em pó obtidos da fração argila das sete classes dos solos (PVd, PVAd, PAd, Cxve, RRd, MTto e RQo), na profundidade de 0,0 – 0,20 m. Mi - mica, Qz- quartzo, An - anatásio, Fp - feldspato, Cb - cristobalita, Il - ilmenita e Es - esmectita.86
- Figura 2.** Médias de matéria seca de parte aérea - MSPA (Figura 2A), de matéria seca de raízes - MSR (Figura 2C) e de matéria seca total - MST (Figura 2E) de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figuras 2B, 2D e 2F). Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.....97
- Figura 3.** Teor de magnésio - Mg (Figura 2A) e acúmulo de magnésio – AMg (Figura 2C) na matéria seca de parte aérea de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figuras 2 B e 2D). Médias seguidas de letras não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.102
- Figura 4.** Eficiência de uso de potássio – EUK, (Figura 3 A), cálcio - EUCa (Figura 3C) e eficiência de uso de magnésio - EUMg (Figura 3E) para produção de matéria seca de parte aérea de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figuras 3B, 3D

e 3F). Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade..... 105

Figura 5. Taxa de transpiração – E (Figura 4A) em mudas de eucaliptus cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figura 4B). Médias seguidas de letras não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade..... 109

Figura 6. Distribuição das variáveis de crescimento, nutricionais e fisiológicas das plantas (Figuras 5A e 5B)) e das classes de solos (Figuras 5C e 5D) pela análise de componentes principais para variáveis biométricas, nutricionais fisiológicas em mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição mineral de K, Ca e Mg. 112

LISTA DE QUADROS

SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1

- Quadro 1.** Classificação, símbolo e coordenadas geográficas dos solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul46
- Quadro 2.** Atributos químicos, relações Ca/Mg trocáveis e granulométricos em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul.....47
- Quadro 3.** Médias e desvio padrão do incremento médio anual (IMA) volumétrico de *Eucalyptus sp.* estimado para os sete anos de idade, em solos do Estado do Rio Grande do Sul (dados fornecidos pela CMPC Celulose Riograndense).53
- Quadro 4.** Quadrado médio e teste de média para teores de K, Ca e Mg nos compartimentos: reserva (R), não-trocável (NT), trocável (T) e disponível (D), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul.....54
- Quadro 5.** Coeficientes de correlação de Pearson para os compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T), disponível (K-D), cinética de liberação (K-CL, Ca-CL e Mg-CL), bem como o incremento médio anual (IMA) , em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul 64

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGO 2

- Tabela 1.** Classificação, símbolo, coordenadas geográficas e incremento médio anual (IMA) de madeira de eucalipto dos solos utilizados no experimento.83
- Tabela 2.** Atributos químicos, cinética de liberação de K, Ca e Mg e granulométricos na profundidade de 0 – 0,20 m de sete classes de solos utilizadas no estudo.84
- Tabela 3.** Nutrientes, concentrações e fontes empregadas na adubação de plantas do experimento.89
- Tabela 4.** Soma de quadrados da análise de variância para as variáveis altura (H), diâmetro de caule (DC), matéria seca de parte aérea (MSPA), de raiz (MSR) e total (MST), teores foliares de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), acúmulos de potássio (AK), cálcio (ACa) e magnésio (AMg), eficiências de utilização de potássio (EUK), cálcio (EUCa) e magnésio (EUMg), taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração (E) em mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg.92
- Tabela 5.** Médias de altura de plantas (H) e diâmetro do caule (DC) em mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg.94
- Tabela 6.** Teores de potássio (K), de cálcio (Ca), acúmulos de potássio (AK) e de cálcio (ACa) na matéria seca de parte aérea de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg. 100

Tabela 7.	Médias de eficiência de uso de magnésio (EUMg) em mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg.....	106
Tabela 8.	Taxa fotossintética (A) em mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg.	107

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	17
1 INTRODUÇÃO	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 A cultura do eucalipto e sua demanda por K, Ca e Mg	19
2.2 Mineralogia e reservas de K, Ca e Mg nos solos	22
2.3 Compartimentos de K, Ca e Mg nos solos	24
2.4 Cinética de liberação de K, Ca e Mg nos solos	27
2.5 Considerações gerais	29
REFERÊNCIAS	31
SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	38
ARTIGO 1 COMPARTIMENTOS DE K, CA E MG EM SOLOS CULTIVADOS COM EUCALIPTO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DE MADEIRA	38
ARTIGO 2 Crescimento, nutrição, fisiologia e produtividade de eucalipto em solos com diferentes compartimentos de K, Ca e Mg...	74

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A silvicultura representa uma atividade estratégica para o desenvolvimento econômico, social e sustentável do Brasil, sendo responsável pela criação e manutenção de empregos, renda e arrecadação de tributos para o país. Atualmente a área ocupada com florestas plantadas nas diferentes regiões brasileiras superam 7,7 milhões de hectares, sendo 5,6 milhões ocupados com a cultura do eucalipto, a qual apresenta produtividade média de $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e responde por 1,7% do produto interno bruto (PIB) do país (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2015). No entanto, diante desta realidade e das perspectivas de expansão, a obtenção de produções contínuas, economicamente rentáveis e que ofereçam baixos riscos de degradação ambiental, é um desafio para as empresas do setor florestal, especialmente no que se refere ao manejo racional dos solos.

As preocupações com a sustentabilidade na eucaliptocultura assumem importância bastante relevante no que se refere ao manejo dos solos, pois esta cultura demanda quantidades elevadas de nutrientes ao longo do seu ciclo, principalmente K, Ca e Mg (ANDRADE et al., 2011), dos quais necessitam em média de 154, 270 e 55 kg respectivamente, para produção de cada 100 toneladas de biomassa (SANTANA et al., 2008). Parte das demandas do eucalipto por K, Ca e Mg pode ser naturalmente suprida pelas reservas minerais presentes nos diferentes compartimentos dos solos (ALVES et al., 2013). Desse modo, a avaliação da capacidade das reservas naturais dos solos em fornecer K, Ca e Mg para as plantas, constitui um requisito importante para avaliação da fertilidade dos solos, podendo permitir adequações do manejo das adubações em áreas cultivadas com eucalipto, e consequente, redução dos custos.

Diversos fatores influenciam a produção de plantios de eucalipto, dentre os quais se citam a presença de reservas minerais nos solos (ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015; CASTRO et al., 2010), o balanço de nutrientes no sistema solo-planta (SANTANA et al., 2008), a absorção e utilização de nutrientes (AMARAL et al., 2011), bem como a eficiência dos processos fisiológicos das plantas, que são essenciais para produção de biomassa. Conhecimentos sobre a eficiência de utilização de nutrientes e de processos fisiológicos pelas plantas podem auxiliar silvicultores e técnicos no momento da escolha da espécie e no manejo florestal para determinados solos e regiões (CALDEIRA; RONDON NETO; SCHUMACHER, 2004), permitindo também o planejamento das plantações de acordo com a fertilidade de cada área (LIMA et al., 2005) e obtenção de produções florestais contínuas e sustentáveis, sobretudo em condição de baixa disponibilidade de nutrientes nos solos (FARIA et al., 2008), situação mais comum no Brasil.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivos: 1) avaliar os teores de K, Ca e Mg nos compartimentos de reserva, não trocável, trocável, disponível e a velocidade de sua liberação, suas correlações e seus efeitos na produtividade (incremento médio anual – IMA - de madeira) do eucalipto, em sítios florestais cultivados em solos das províncias geomorfológicas da Depressão Periférica, Escudo Sul-Rio-Grandense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul; (2) avaliar o crescimento inicial, a nutrição e aspectos fisiológicos de plantas de eucalipto cultivadas com e sem a adição de fontes minerais de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), nos solos acima mencionados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do eucalipto e sua demanda por K, Ca e Mg

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae cujo centro de origem é a Austrália. Este gênero possui aproximadamente 700 espécies e está disseminado por todos os continentes, sendo introduzido na Ásia (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1981) e na Europa (PRYOR, 1976) no início do século XVIII; na África e nas Américas, a introdução se deu por volta do ano de 1828 (ANDRADE, 1961). No Brasil, os primeiros registros sobre plantios de espécies do gênero *Eucalyptus* datam do início do século XIX, sendo cultivadas como plantas ornamentais (ANDRADE, 1961). A partir de 1904 passou também a ser cultivado para fins madeireiros com o objetivo de produzir lenha para combustíveis das locomotivas e dormentes para trilhos de companhias ferroviárias paulistas (MARTINI, 2009).

Atualmente, em função das condições edafoclimáticas favoráveis, multiplicidade de usos e rápido crescimento inicial, as plantações de eucalipto ocupam o maior percentual entre as árvores plantadas no território brasileiro. No entanto, a obtenção de produções contínuas e que não ofereçam riscos elevados de degradação ambiental constituem preocupações atuais entre os eucaliptocultores, já que esta cultura requer elevadas quantidades de nutrientes durante seu desenvolvimento, principalmente K, Ca e Mg (ANDRADE et al., 2011). Para produção de cada 100 toneladas de biomassa, nas diversas regiões brasileiras, as várias espécies de eucalipto demandam, em média, 154 kg de K, 270 kg de Ca e 55 kg de Mg, sendo os maiores requerimentos observadas nas fases que antecedem aos 4,5 anos de idade (SANTANA et al., 2008), o que pode estar relacionado com as maiores exigências das plantas por esses nutrientes para formação da copa (SCHUMACHER; CALDEIRA, 2001).

Entre os fatores que influenciam a produção das florestas plantadas, citam-se a ocorrência de reservas minerais que são fontes de nutrientes nos solos (ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015; CASTRO et al., 2010), o balanço de nutrientes no sistema solo-planta (SANTANA et al., 2008), a capacidade das plantas de absorverem e utilizarem os nutrientes (AMARAL et al., 2011), além da eficiência dos processos fisiológicos das plantas para produção de biomassa. Os atributos químicos e mineralógicos dos solos (CASTRO et al., 2010), a cinética de liberação de macronutrientes pelas reservas minerais (AMARAL et al., 2015), a eficiência de utilização de nutrientes e a fisiologia (LIMA et al., 2005; FARIA et al., 2008) estão direta e indiretamente associados ao crescimento e produtividade do eucalipto.

Os teores de K adequados ao desenvolvimento vegetal variam de 6 a 50 g kg⁻¹ de matéria seca (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), sendo esse nutriente responsável pela ativação enzimática, síntese de proteínas, abertura e fechamento de estômatos, osmorregulação, transportes via floema, absorção e balanço catiônico (MARSCHNER, 2012). Quando não há restrições na disponibilidade de K na solução do solo, as plantas expressam maiores taxas fotossintéticas, elevam o controle sobre as perdas de água e a resistência ao ataque de pragas e doenças (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

As concentrações de Ca nos tecidos vegetais, necessários ao desenvolvimento vegetal satisfatório, variam de 1 a 80 g kg⁻¹ na matéria seca (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), sendo esse nutriente essencial ao crescimento e ao funcionamento meristemático das plantas, o qual exerce funções estruturais e de manutenção da integridade de membranas citoplasmáticas (MARSCHNER, 2012). Plantas deficientes em Ca expressam menor crescimento de raízes, senescência precoce de folhas (DECHEN; NACHTIGALL, 2007) e morte de meristemas (SILVEIRA et al., 2002).

A concentração de Mg no tecido vegetal varia de 1 a 10 g kg⁻¹ de matéria seca (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). Dentre as funções desse nutriente, destacam-se a de compor a molécula da clorofila e a ativação de enzimas, na síntese de proteínas, além de estimular a absorção, o transporte e a distribuição de outros nutrientes nas plantas (MARSCHNER, 2012). Quando os teores de Mg são adequados, as plantas elevam sua taxa fotossintética, síntese proteica, absorção e distribuição de outros nutrientes e, conseqüentemente, o aumento do crescimento vegetal.

Os teores de K, Ca e Mg, exigidos para uma adequada nutrição das plantas, variam entre as espécies. Para a cultura do eucalipto, as concentrações foliares desses nutrientes, necessárias ao seu desenvolvimento satisfatório, variam de 8 a 12 g kg⁻¹, de 4 a 5 g kg⁻¹ e de 10 a 12 g kg⁻¹ da matéria seca, para K, Ca e Mg respectivamente (MALAVOLTA, 1987). Diversos estudos demonstraram que a elevação na disponibilidade desses elementos, na solução do solo ou no substrato de cultivo, favorece o aumento na produção de biomassa e no crescimento do eucalipto (ÁVILA et al., 2011; BELLOTE; FERREIRA, 1993; SILVA; COELHO, 2010), sendo o K e o Ca os nutrientes mais limitantes ao crescimento dessa cultura (SANTANA; BARROS; NEVES, 2002).

O crescimento e a produtividade das plantações de eucaliptos estão direta e indiretamente associados com as características químicas e mineralógicas dos solos, a cinética de liberação de K, Ca e Mg pelas reservas minerais, a eficiência de utilização de nutrientes e a fisiologia das plantas. O incremento médio anual (IMA) de *Eucalyptus* sp. varia em função dos teores totais de K, Ca e Mg e da mineralogia dos solos (CASTRO et al., 2010), da cinética de liberação de K, Ca e Mg pelas reservas minerais dos solos (AMARAL et al., 2015), do conteúdo e da eficiência de utilização de nutrientes (LIMA et al., 2005; FARIA et al., 2008).

O conhecimento sobre a eficiência de utilização de K, Ca e Mg em espécies ou clones de eucalipto representa grande importância prática para os silvicultores, principalmente no momento da escolha do material a ser utilizado nos plantios florestais (CALDEIRA; RONDON NETO; SCHUMACHER, 2004). Estudos que envolvem atributos dos solos, características nutricionais, fisiológicas e de produtividade de eucalipto no campo constituem inovações científicas que podem auxiliar pesquisadores e técnicos na indicação do manejo nutricional mais adequado de florestas plantadas, a ser adotado para cada classe de solo.

2.2 Mineralogia e reservas de K, Ca e Mg nos solos

A composição química e mineralógica dos solos varia em função do material de origem, da textura e do clima de cada região. Os minerais primários são predominantemente encontrados nas frações mais grosseiras dos solos, como a areia e o silte, enquanto que os minerais secundários representam os principais constituintes da fração argila dos solos (CASTRO et al., 2010). A presença de minerais primários constitui um indicativo da ocorrência de reservas de nutrientes em solos (REATTO et al., 1998), as quais representam fontes potenciais de nutrientes para as plantas, pois são liberados para solução em longo, médio e curto prazo (COSTA, 1979). Os minerais secundários, por predominarem na fração argila, exercem maior importância na retenção de cátions e ânions nos solos (RESENDE et al., 2007).

Tanto os minerais primários quanto os minerais secundários podem ser encontrados nas diferentes frações granulométricas dos solos, sendo anfíbios, biotitas, cloritas, esmectitas, feldspatos, micas, piroxênios e vermiculitas os mais comumente relacionados como fontes de K, Ca e de Mg, que são liberados para a solução dos solos a partir de intemperismos físicos e químicos destes minerais (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009). A reposição natural de K para a solução

do solo depende, principalmente, da ocorrência de alterações estruturais de feldspatos e de micas (KÄMPF; CURI, 2003).

A maior contribuição do suprimento de Ca e Mg para a solução do solo resulta, principalmente, do intemperismo de feldspatos, de micas e de vermiculitas (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009). Nos solos brasileiros, esses minerais são frequentemente encontrados nas regiões de ocorrência de climas subtropicais, especialmente no estado do Rio Grande do Sul (BORTOLUZZI et al., 2005; FRAGA et al., 2009; CASTRO et al., 2010; MELO; MEURER; PINTO, 2004). Os feldspatos são encontrados com maior frequência nas frações areia e silte dos solos (HUANG, 1989), principalmente daqueles originados de rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, nas quais o K presente na sua estrutura não está prontamente disponível, constituindo uma importante reserva desse nutriente para as plantas em longo prazo (CURI; KÄMPF; MARQUES, 2005).

Os minerais de micas são encontrados, predominantemente, na fração argila de solos, especialmente, naqueles que têm granitos, argilitos, filitos, folhelhos e arenitos como materiais de origem (KÄMPF; CURI, 2003). Estes minerais constituem fontes de K com maior ocorrência nos solos (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009). Já os minerais como as vermiculitas e esmectitas resultam, principalmente, da alteração estrutural de feldspatos e micas (BORTOLUZZI; PERNES; TESSIER, 2007), os quais têm composição química bastante semelhante à dos minerais que lhes deram origem, sendo considerados importantes fontes de K, Ca e Mg para a solução do solo (CURI; KÄMPF; MARQUES, 2005).

Alterações na estrutura de minerais e a velocidade com que os nutrientes K, Ca e Mg suprem a solução do solo dependem de fatores químicos, físicos e biológicos. Ambientes com temperatura e umidade elevadas, bem como a redução dos teores de K, Ca e Mg na solução do solo, pela absorção radicular ou

através das perdas por lixiviação e erosão, favorecem o aumento da velocidade de liberação desses nutrientes pelas reservas do solo (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007), visto que esses fatores aceleram o intemperismo dos minerais permitindo o equilíbrio entre as fases sólidas e líquidas. Na medida em que são reduzidas as concentrações de K, Ca e Mg na solução dos solos, as reservas tendem a repor estes nutrientes, restabelecendo um novo equilíbrio entre os seus teores presentes no compartimento de reserva e os teores presentes nas frações prontamente disponíveis para as plantas (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009).

2.3 Compartimentos de K, Ca e Mg nos solos

O K é encontrado nos solos nos compartimentos estrutural, não trocável, disponível e na solução, enquanto o Ca e o Mg também são encontrados no compartimento trocável. As diferenças entre cada uma das formas em que o K, Ca e o Mg são encontrados nos solos se devem ao modo e a energia com que os mesmos estão ligados na estrutura dos minerais e aos demais componentes sólidos dos solos. Os compartimentos estruturais, não trocáveis, trocáveis e disponíveis estabelecem um equilíbrio contínuo e dinâmico para estes nutrientes nos solos. A velocidade com que as reservas minerais repõem K, Ca e Mg para a solução do solo é regulada, principalmente, pela estabilidade e velocidade de transformações dos minerais pelos processos químicos, físicos e biológicos, os quais dependem do pH do meio, da presença de ácidos orgânicos, de íons inorgânicos, da eficiência dos processos de precipitação e da remoção dos nutrientes da solução do solo (KÄMPF; CURI; MARQUES, 2009).

Os compartimentos estruturais não trocáveis, trocáveis e disponíveis de K, Ca e Mg constituem as reservas desses nutrientes nos solos, onde os compartimentos disponíveis de K e trocáveis de Ca e Mg se encontram prontamente acessíveis para as plantas (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). O K, Ca e Mg presentes na forma estrutural representam o maior compartimento

destes nutrientes nos solos, e mantêm um equilíbrio com os compartimentos prontamente disponíveis para as plantas a partir da alteração estrutural dos minerais, tendo importância relevante para a nutrição mineral de espécies florestais (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007). O K não trocável é constituído por parte do compartimento estrutural, sendo que nos solos que possuem baixas concentrações deste nutriente no compartimento disponível e/ou com teores substanciais de argila do tipo 2:1, este compartimento contribui significativamente para o fornecimento de K em médio e longo prazo para a solução do solo (COX et al., 1999; SILVA et al., 1995).

O K disponível, bem como o Ca e Mg trocáveis constituem o compartimento desses nutrientes ligados eletrostaticamente às cargas negativas na superfície de coloides orgânicos e minerais, os quais se encontram prontamente acessíveis para as raízes e exercem funções relevantes para a nutrição mineral das plantas. Esse compartimento possui elevada capacidade de restituir K, Ca e Mg retirados da solução do solo pela absorção radicular ou perdidos por lixiviação (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). O compartimento de K disponível e de Ca e Mg trocáveis são facilmente trocados por outros cátions da solução do solo e contribuem de forma efetiva e imediata para a nutrição mineral das plantas. A quantificação dos teores de K disponível e de Ca e Mg trocáveis é realizada em laboratórios e emprega extratores químicos diversos, sendo os procedimentos metodológicos oficiais descritos em Embrapa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2009), como o emprego de ácidos diluídos (Mehlich-1) para a extração dos teores dos nutrientes disponíveis e de cloreto de potássio para extração dos teores trocáveis de Ca e Mg.

O K, Ca e Mg dos compartimentos de reserva, determinados em ácido nítrico fervente, o compartimento não trocável e trocável já foram estudados por diversos pesquisadores (CASTRO et al., 2010; MARCHI et al., 2012; REATTO

et al., 1998; SILVA et al., 2000; STAUGAITIS; RUTKAUSKIENÈ, 2010; VILLA; FERNANDES; FAQUIN, 2004). No entanto, a proporção entre esses compartimentos varia conforme o material de origem, a mineralogia, o grau de desenvolvimento, a profundidade e o manejo dos solos (ALVES et al., 2013; CASTRO et al., 2010; MARTINS; MELO; SERRA, 2004; MELO et al., 2000; MELO et al., 2003). As variações nos teores de K, Ca e Mg entre os compartimentos de reserva, não trocáveis, trocáveis e disponíveis, bem como da cinética de liberação desses nutrientes e da relação desses compartimentos com a produtividade das plantas, especialmente de eucalipto, constituem parâmetros indicativos da capacidade dos solos de fornecerem esses nutrientes para a solução. Além disso, estudos dessa natureza permitem a realização de adequações que podem auxiliar no manejo nutricional de sítios florestais e, conseqüentemente, na obtenção de produções economicamente viáveis e sustentáveis.

Os compartimentos estruturais representam as mais importantes reservas de K, Ca e Mg nos solos, os quais contribuem efetivamente para o suprimento desses nutrientes para solução dos solos em longo prazo. No entanto, a velocidade com que os compartimentos estruturais repõem os compartimentos de K disponível e de Ca mais Mg trocável varia entre classes e profundidades dos solos, sendo regulada pela mineralogia, pH, tamanho de partículas, presença de ácidos orgânicos e de outros íons e, pelo teor desses nutrientes na solução (CASTILHOS; MEURER, 2001; MELO et al., 2005). A quantificação da cinética de liberação de K, Ca e Mg pelas reservas minerais dos solos podem auxiliar na compreensão da eficiência de disponibilização desses nutrientes para as plantas a partir das reservas minerais nos seus diversos compartimentos.

2.4 Cinética de liberação de K, Ca e Mg nos solos

A intensidade da cinética de liberação de K, Ca e Mg é, normalmente, governada pelo fenômeno de difusão, em que uma baixa concentração desses nutrientes na solução gera maior gradiente entre a fração prontamente disponível e o compartimento de reserva dos solos, o que favorece a sua liberação a taxas mais elevadas (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). Para o K, a redução na sua concentração para valores iguais ou menores que 4 mg kg^{-1} maximiza a liberação do nutriente nos solos (MARTIN; SPARKS, 1985). Contudo, existem outros fatores que podem restringir ou potencializar a solubilização dos minerais e, conseqüentemente, a cinética de liberação de K, Ca e Mg para a solução do solo. Entre esses fatores destacam-se a estrutura dos minerais e a sua susceptibilidade aos processos de intemperismos químicos, físicos e biológicos.

A quantificação da cinética de liberação de K, Ca e Mg, em condições experimentais, tem como objetivos simular as condições naturais de dessorção destes nutrientes pelas reservas minerais dos solos (MELO et al., 2005). A existência de diferentes sítios de adsorção, variações no tamanho de partículas, variabilidade de minerais e o grau de intemperismo dos minerais, interferem efetivamente na cinética de liberação de K, Ca e Mg pelos solos. Em solos de regiões temperadas, Simard, Kimpe e Zizka (1992) verificaram contribuições mais efetivas da fração silte sobre a cinética de liberação de K e Mg em solos do Canadá, o que, segundo esses autores, se deve à presença de feldspatos, cloritas, micas e vermiculitas nos solos. No entanto, em solos de regiões predominantemente tropicais, Melo et al. (2005) observaram que a fração argila de Argissolos originados de arenito apresentam maior influência sobre a velocidade de liberação de K e Mg, vistos que a maioria dos minerais se encontra na fração argila desses solos. Certamente, as variações na composição mineralógica, associadas ao variado grau de intemperismos entre solos das

regiões temperadas e tropicais, justificam, em parte, as diferenças observadas na cinética de liberação de K e Mg.

Os estudos sobre cinética de liberação de nutrientes, normalmente, são realizados a partir de extrações sucessivas que empregam soluções salinas (DARUNSONTAYA et al., 2010; HOSSEINPUR; MOTAGHIAN; SALEHI, 2012; JALALI, 2006; JALALI, 2008; SPARKS; JARDINE, 1984), ácidos orgânicos (AMARAL et al., 2015; CASTILHOS; MEURER, 2001; MELO et al., 2005; SILVA et al., 2008; SIMARD; KIMPE; ZIZKA, 1992; SONG; HUANG, 1988) e resinas trocadoras de cátions (AGBENIN; RAIJ, 1999; HAVLIN; WESTFALL; OLSEN, 1985; MEURER; ROSSO, 1997). Os resultados obtidos empregando esses procedimentos mostram elevadas correlações entre os teores de K, Ca e Mg liberados pelas reservas minerais dos solos e os teores desses nutrientes absorvidos pelas plantas (AMARAL et al., 2015; HOSSEINPUR; MOTAGHIAN; SALEHI, 2012; MARTINS; MELO; SERRA, 2004; MELO et al., 1995).

O emprego de ácidos orgânicos como extratores em estudos sobre cinética de liberação de K, Ca e Mg pelos solos simulam de forma bastante precisa o efeito das plantas sobre a cinética de liberação desses nutrientes e, portanto, esses extratores devem ser preferidos nestes estudos (MELO; CASTILHOS; PINTO, 2009). A melhor adequação dos ácidos orgânicos se deve ao fato de que os ácidos orgânicos estão envolvidos nos processos de intemperismo dos minerais nos solos (SIMARD; KIMPE; ZIZKA, 1992) e são naturalmente sintetizados pelas plantas e liberados na região da rizosfera. A capacidade acidificadora e o efeito complexante dos radicais carboxílicos presentes nesses compostos aceleram o intemperismo dos minerais e aumentam a cinética de liberação de nutrientes pelas reservas minerais dos solos. Entre os ácidos orgânicos empregados em estudos sobre cinética de liberação de nutrientes, o ácido cítrico, em concentrações variando entre 0,001 e 0,1 mol L⁻¹,

tem sido utilizado em diversos estudos, tanto nas frações areia, silte e argila do solo quanto na terra fina seca ao ar (AMARAL et al., 2015; CASTILHOS; MEURER, 2001; SILVA et al., 2008; SIMARD; KIMPE; ZIZKA, 1992).

A cinética de liberação de K, Ca e Mg nos solos é estudada a partir da modelagem matemática, em que a escolha do modelo que melhor se ajusta à cinética de liberação de nutrientes é feita com base na estimativa dos valores de coeficientes de determinação (R^2) e erro padrão da estimativa (EP), calculados para o modelo empregado, sendo considerado adequado aquele modelo que apresentar maiores valores de r^2 e menores de EP. Estudos sobre cinética de liberação de K, Ca e Mg em solos, a partir da modelagem matemática, são frequentemente reportados pela literatura e explicam satisfatoriamente o processo de liberação desses nutrientes (AMARAL et al., 2015; CASTILHOS; MEURER, 2001; DARUNSONTAYA et al., 2010; HOSSEINPUR; MOTAGHIAN; SALEHI, 2012; MELO et al., 2005; SIMARD; KIMPE; ZIZKA, 1992; SILVA et al., 2008; SONG; HUANG, 1988; SPARKS; JARDINE, 1984).

2.5 Considerações gerais

A quantificação dos teores de K, Ca e Mg nos diferentes compartimentos, bem como a velocidade de liberação desses nutrientes para a solução do solo, é de grande importância para o manejo da fertilidade dos solos agrícolas, particularmente, daqueles destinados ao cultivo de espécies de ciclo longo e que possuem exigências nutricionais variadas para cada fase do seu desenvolvimento. Atualmente, a recomendação de fertilizantes, para as diversas culturas agrícolas, é feita com base nos teores trocáveis/disponíveis dos nutrientes e na expectativa de produtividade.

No entanto, em determinadas condições de solo e clima, teores trocáveis/disponíveis não representam as condições reais da capacidade dos

solos em fornecer nutrientes em quantidades adequadas, pois, não incluem os nutrientes presentes nos compartimentos de reserva e não trocável dos solos nem a velocidade com que estes são liberados para a solução do solo. Programas de manejo da fertilidade que consideram apenas as frações dos nutrientes prontamente disponíveis para as plantas podem induzir a sub- ou superestimação da necessidade de aplicação de fertilizantes nos solos, podendo reduzir a produtividade das culturas e elevar os custos de produção.

Considerando que as maiores exigências do eucalipto em K, Ca e Mg ocorrem na fase inicial de crescimento, pode-se inferir também que a contribuição das reservas e as formas não trocáveis para nutrição mineral das plantas, torna-se efetivamente importante em fases posteriores da cultura. Desse modo, solos que apresentam maiores reservas minerais e maior cinética de liberação de K, Ca e Mg também possuem potencial considerável para suprimento desses nutrientes às plantações de eucalipto a médio prazo.

REFERÊNCIAS

- AGBENIN, J. O.; RAIJ, B. V. Rate process of calcium, magnesium and potassium desorption from variable charge soils by mixed ion exchange resins. **Geoderma**, Amsterdam, v. 93, n. 1/2, p. 141-157, Nov. 1999.
- ALVES, M. J. F. et al. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1599-610, nov./dez. 2013.
- AMARAL, F. H. C. et al. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de liberação de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 979-991, dez. 2015.
- AMARAL, J. F. T. et al. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 621-629, abr. 2011.
- ANDRADE, E. N. de. **O eucalipto**. 2. ed. Jundiaí: Companhia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 667 p.
- ANDRADE, M. C. N. et al. Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de espécies e clones de eucalipto visando o cultivo de shiitake em toras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 83-92, mar./abr. 2011.
- ÁVILA, F. S. et al. Efeito do potássio na fase de rustificação de mudas clonais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 13-19, jan. 2011.
- 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 Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 26/27, p. 17-28, 1993.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Alterações na mineralogia de um Argissolo do rio grande do sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p.327-335, maio/jun. 2005.
- BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M.; TESSIER, D. Interestratificado caulinita-esmectita em um Argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1291-1300, nov./dez. 2007.

CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V. Eficiência do uso de micronutrientes e sódio em três procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 39-47, jan./fev. 2004.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 1-10, jan./fev. 2001.

CASTRO, P. P. et al. Química e mineralogia de solos cultivados com eucalipto (*Eucalyptus sp.*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 645-657, dez. 2010.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1979. 527 p.

COX, A. E. et al. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 4, p. 902-911, June 1999.

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 71-91.

DARUNSONTAYA, T. et al. The kinetics of potassium release to sodium tetraphenylboron solution from the clay fraction of highly weathered soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 50, n. 3, p. 376-385, Nov. 2010.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS/UFV, 2007. p. 92-132.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2009. 628 p.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS/UFV, 2007. p. 551-594.

FARIA, G. E. et al. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus spp.* no Vale do Jequitinhonha, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 363-373, jul./set. 2008.

FONSECA, J. A. da; MEURER, E. J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 47-50, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Eucalypts for planting**. Rome: FAO, 1981. 369 p. (FAO Forestry Series, 11).

FRAGA, T. I. et al. Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 497-506, mar./jun. 2009.

HAVLIN, J. L.; WESTFALL, D. G.; OLSEN, S. R. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 371-376, Mar. 1985.

HOSSEINPUR, A. R.; MOTAGHIAN, H. R.; SALEHI, M. H. Potassium release kinetics and its correlation with pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) plant índices. **Plant, Soil and Environment**, Beijing, v. 58, n. 7, p. 328-333, July 2012.

HUANG, P. M. Feldspars, olivines, pyroxenes, and amphiboles. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B.(Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 975-1050.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015**: ano base 2014. Brasília: Ibá, 2015. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em :21 jan. 2016.

JALALI, M. Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 3/4, p. 207-215, June 2008.

JALALI, M. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 63-71, Nov. 2006.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**: volume 3. Viçosa: Editora da UFV, 2003. p. 1-54.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 573-610.

LIMA, A. M. N. et al. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 903-909, nov./dez. 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de calagem e adubação das principais culturas**. São Paulo: Ceres, 1987. 496 p.

MARCHI, G. et al. Potassium extractability from soils of Brazilian coffee regions. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 28, n. 6, p. 913-919, nov./dez. 2012.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rded. San Diego: Academic Press, 2012. 651 p.

MARTIN, H. W.; SPARKS, D. L. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, n. 2, p. 133-162, 1985.

MARTINI, A. J. Horto Florestal (atual FEENA) completa 100 anos. **Arquivo**, Rio Claro, v. 3, p. 13-16, 2009.

MARTINS, R.; MELO, V. F.; SERRA, T. B. s. Métodos de determinação da disponibilidade de potássio para a cultura do trigo em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 298, p. 787-801, 2004.

MARTINS, R.; MELO, V. F.; SERRAT, B. M. Reserva mineral de potássio em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 296, p. 521-533, 2004.

MELO, G. W.; MEURER, E. J.; PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no rio grande do sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 597-603, jul./ago. 2004.

MELO, V. F. et al. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração argila de solos do triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 533-545, jul./ago. 2005.

MELO, V. F. et al. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 165-171, jan. 1995.

MELO, V. F. et al. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 807-819, set./out. 2003.

MELO, V. F. et al. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 269-284, abr./jun. 2000.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**: parte I, conceitos básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 251-332.

MEURER, E. J.; ROSSO, J. I. Cinética de liberação de potássio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 553-558, jul./set. 1997.

PRYOR, L. D. **The biology of eucalyptus**. London: Edward Arnold, 1976. 82 p.

REATTO, A. et al. Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do Vale do Rio Doce, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 255-266, abr./jun. 1998.

RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: Editora da UFLA, 2007. 322 p.

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

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 447-457, mar./abr. 2002.

SCHUMACHER, M.; CALDEIRA, M. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-especie maidenii. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 45-53, 2001.

SILVA, D. N. et al. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 433-439, 1995.

SILVA, I. R. et al. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2065-2073, out. 2000.

SILVA, J. C.; COELHO, L. Calcário e silicato aplicados em eucalipto: efeito no solo e na planta. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 919-924, nov./dez. 2010.

SILVA, V. A. et al. Kinetics of k release from soils of Brazilian coffee regions: effect of organic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 533-540, mar./abr. 2008.

SILVEIRA, R. L. V. A. et al. Sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 108-117, 2002.

SIMARD, R. R.; KIMPE, C. R. de; ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 5, p. 1421-1428, Sept. 1992.

SONG, S. K.; HUANG, P. M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 383-390, Feb. 1988.

SPARKS, D. L.; JARDINE, P. M. Comparison of kinetic equations to describe potassium-calcium exchange in pure and mixed systems. **Soil Science**, Baltimore, v. 138, n. 2, p. 115-122, 1984.

STAUGAITIS, G.; RUTKAUSKIENĖ, R. Comparison of magnesium determination methods as influenced by soil properties. **Zemdirbyste (Agriculture)**, Kaunas, v. 97, n. 3, p. 105-116, abr./jun. 2010.

VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 649-658, jul./ago. 2004.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 COMPARTIMENTOS DE K, CA E MG EM SOLOS
CULTIVADOS COM EUCALIPTO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL
(IMA) DE MADEIRA**

Artigo formatado de acordo com as Normas da **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (RBCS), submetido em 11/03/2016, na Comissão 3.1 – Fertilidade do solo e nutrição mineral de plantas – Divisão 3 – Uso e manejo do solo.

(VERSÃO PRELIMINAR)

1 COMPARTIMENTOS DE K, CA E MG EM SOLOS CULTIVADOS COM
2 EUCALIPTO E INCREMENTO MÉDIO ANUAL (IMA) DE MADEIRA

3

4 Francisco Hécio Canuto Amaral¹, Antonio Eduardo Furtini Neto², Alberto
5 Vasconcellos Inda³, Elias Frank de Araújo⁴ & Nilton Curi⁵

6

7 ¹Doutorando em Ciência do Solo. Departamento de Ciência do Solo – DCS.
8 UFLA – Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-
9 000 – Lavras, MG. E-mail: helcioagro@gmail.com;

10 ²Pesquisador. – ITV DS – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento
11 Sustentável. Rua Boaventura da Silva – de 415/416 a 1147/1148 – Nazaré -
12 66055-090 – Belém, PA. E-mail: antonio.furtini@itv.org;

13 ³Professor Associado do Departamento de Solos. UFRGS – Universidade
14 Federal do Rio Grande do Sul / Faculdade de Agronomia. Caixa Posta, 15100 -
15 Av. Bento Gonçalves, 7712 – 90001-970 – Porto Alegre, RS. E-mail:
16 alberto.inda@ufrgs.br;

17 ⁴Engenheiro Florestal. CMPC Celulose do Brasil Ltda. E-mail:
18 efaraujo@cmpcrs.com.br

19 ⁵Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo. UFLA - Universidade
20 Federal de Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-000 – Lavras, MG. E-
21 mail: niltcuri@dcs.ufla.br.

22

23 **RESUMO**

24 A atividade florestal tem crescido de forma contínua no Brasil, e as
25 preocupações com a obtenção de produções sustentáveis também vem
26 aumentando entre as empresas que atuam no setor de florestas plantadas.
27 As reservas minerais e a cinética de liberação de nutrientes pelos solos
28 ainda não são consideradas no manejo da fertilidade dos solos cultivados

29 com espécies florestais e poderiam representar uma oportunidade de
30 otimização da atividade florestal. Os objetivos deste estudo foram avaliar
31 os teores de K, Ca e Mg nos compartimentos de reserva, não-trocável,
32 trocável, disponível e a velocidade de sua liberação, suas correlações e
33 seus efeitos na produtividade (incremento médio anual – IMA – de
34 madeira) de plantios de eucalipto, em sítios florestais cultivados em solos
35 do Estado do Rio Grande do Sul. Os teores de K, Ca e Mg foram
36 determinados em extrato de digestão sulfúrica, em ácido nítrico fervente,
37 em cloreto de amônio, em Mehlich-1 (apenas K) e em cloreto de potássio
38 (Ca e Mg). Foi também avaliada a velocidade de liberação destes
39 nutrientes nos solos e calculadas as proporções de K, Ca e Mg e suas
40 relações em cada compartimento. A existência de correlações
41 significativas entre os compartimentos evidencia a importância das
42 reservas de K, Ca e Mg, disponíveis em longo, médio e curto prazo, para
43 o suprimento destes nutrientes. Os teores de K, Ca e Mg variaram entre os
44 compartimentos e as profundidades nas classes de solos estudadas, sendo
45 que as maiores proporções se encontram no compartimento de reserva,
46 indicando a importância deste compartimento para o suprimento destes
47 nutrientes em médio e longo prazo. A grande maioria dos compartimentos
48 de K, Ca e Mg apresentam correlações significativas entre si, expressando
49 a dependência que existe entre os mesmos e evidenciando a importância
50 da avaliação dos teores destes nutrientes nos diferentes compartimentos
51 para adequar o manejo nutricional das plantas em cada classe de solo e
52 para obtenção de produções contínuas minimizando os impactos
53 negativos ao meio ambiente. A produtividade (IMA) de madeira de
54 eucalipto correlacionou de forma positiva e significativa com os teores de

55 K, Ca e Mg presentes nos diferentes compartimentos, principalmente
56 entre a reserva e a cinética de liberação de K, Ca e Mg, nas duas
57 profundidades, expressando a importância destes para produção de
58 árvores plantadas, especialmente para as espécies vegetais de ciclo mais
59 longo, onde sua liberação a médio e longo prazo se torna importante.

60

61 **Palavras-chave:** Reserva de macronutrientes; cinética de liberação;
62 nutrição de eucalipto.

63

64 **COMPARTMENTS OF K, Ca AND Mg IN SOILS CULTIVATED**
65 **WITH EUCALYPTUS AND WOOD ANNUAL AVERAGE**
66 **INCREMENT**

67

68 **ABSTRACT**

69 Forestry activity has continuously grown in Brazil, and concerns
70 regarding the obtaining of sustainable productions have also increased
71 among companies acting in the sector of planted forests. Mineral reserves
72 and the kinetic release of nutrients by the soils are not yet considered for
73 the fertility management of soils cultivated with forest species, and can
74 represent an opportunity for optimizing forestry activity. The objectives
75 of this study were to evaluate the contents of non-interchangeable,
76 interchangeable and available K, Ca and Mg in the reserve compartments,
77 as well as its release speed, correlations and effects over productivity
78 (wood annual average increment - AAI) of eucalyptus plantations in
79 forest sites cultivated in soils of the state of Rio Grande do Sul, Brazil.
80 The contents of K, Ca and Mg were determined in sulfuric digestion

81 extract, boiling nitric acid, ammonium chloride, Mehlich-1 (only K) and
82 potassium chloride (Ca and Mg). We also evaluated the speed of release
83 of these nutrients in the soils, and calculated the proportions of K, Ca and
84 Mg and its relations in each compartment. The existence of significant
85 correlations between the compartments shows the importance of the
86 reserves of K, Ca and Mg, available in long, intermediate and short terms,
87 for supplying these nutrients. The contents of K, Ca and Mg vary between
88 compartments and depths in the studied soil classes, with the highest
89 proportions found in the reserve compartment, indicating the importance
90 of this compartment for the supplement of these nutrients in long and
91 intermediate terms. The large majority of compartments of K, Ca and Mg
92 present significant correlations among each other, expressing the
93 dependence existent between them and demonstrating the importance of
94 evaluating the contents of these nutrients in the different compartments to
95 adapt the nutritional management of the plants in each soil class, and to
96 obtain continuous productions, minimizing the negative impacts to the
97 environment. Eucalyptus wood productivity (AAI) was positively and
98 significantly correlated to the contents of K, Ca and Mg present in the
99 different compartments, especially between the reserve and the kinetic
100 release of K, Ca and Mg, in both depths, expressing the importance of
101 these nutrients to the production of planted trees, especially for long-cycle
102 plant species, where its release at intermediate and long terms becomes
103 important.

104 Keywords: Macronutrient reserve; release kinetic; eucalyptus nutrition.

105

106

Introdução

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

A atividade florestal tem crescido em ritmo contínuo e vem sendo desenvolvida nas diferentes regiões brasileiras, gerando oportunidades de emprego e impulsionando a economia nos diversos setores da cadeia produtiva. Atualmente, a área ocupada com florestas plantadas já supera os 7,7 milhões de hectares, o que corresponde a 0,9 % do território brasileiro e supre aproximadamente 91 % de toda madeira demandada para fins industriais (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2015). Diante desta realidade e das perspectivas de expansão, a obtenção de produções contínuas em longo prazo, economicamente viáveis e com baixos impactos negativos sobre o meio ambiente representa um desafio constante para as empresas do setor florestal, especialmente no que se refere ao uso adequado dos solos.

Em função da multiplicidade de usos e do seu rápido crescimento, as plantações de eucalipto representam o maior percentual entre as árvores plantadas no Brasil, ocupando cerca de 5,6 milhões de hectares (IBÁ, 2015). Desse modo, as preocupações com a sustentabilidade na eucaliptocultura ocupam dimensões ainda maiores, já que esta cultura demanda elevadas quantidades de nutrientes ao longo do seu ciclo, principalmente K, Ca e Mg (Andrade et al., 2011). Santana et al. (2008), estudando a alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil, observaram que para cada 100 toneladas de biomassa produzida, o eucalipto requer, em média, 154 kg de K, 270 kg de Ca e 55 kg de Mg, sendo as maiores demandas verificadas nas fases que antecedem aos 4,5 anos, devido a maior exigência das plantas por estes nutrientes para formação da copa (Schumacher e Caldeira, 2001).

132 O suprimento de K, Ca e Mg às plantações de eucalipto somente via
133 adição de fertilizantes e corretivos minerais pode elevar os custos de
134 produção e ainda promover danos ambientais, se usados de forma
135 inadequada. Considerando que parte da demanda das plantas por K, Ca e
136 Mg podem ser suprida pelos diferentes compartimentos destes nutrientes
137 nos solos (Alves et al., 2013), a avaliação da capacidade do fornecimento
138 destes nutrientes pode ser importante para um adequado manejo das
139 plantações florestais. O K, Ca e o Mg presentes nos compartimentos de
140 reserva representam indicadores do potencial dos solos fornecerem estes
141 nutrientes às plantas em longo prazo (Castilhos et al., 2002), enquanto
142 que os teores não-trocáveis contribuem para a nutrição das plantas em
143 médio prazo, principalmente após cultivos sucessivos (Kaminski et al.,
144 2007; Werle et al., 2008), enquanto que os compartimentos trocáveis e
145 disponíveis representam disponibilidade imediata para as plantas
146 (Kaminski et al., 2007; Fraga et al., 2009). Além disso, a velocidade de
147 liberação do K, Ca e Mg está relacionada com estes compartimentos e
148 com a produtividade de eucalipto (Amaral et al., 2015).

149 Diversos estudos avaliaram os teores de K, Ca e Mg em solos nos
150 compartimentos de reserva, não-trocável e trocável (Reatto et al., 1998;
151 Silva et al., 2000; Villa et al., 2004; Castro et al., 2010; Staugaitis e
152 Rutkauskienè, 2010; Marchi et al., 2012). A proporção entre estes
153 compartimentos varia, principalmente, em função do material de origem,
154 da mineralogia, do grau de desenvolvimento e da profundidade dos solos
155 (Melo et al., 2000; Melo et al., 2003; Martins et al., 2004; Castro et al.,
156 2010; Alves et al., 2013). A avaliação das variações nos teores de K, Ca e
157 Mg entre os compartimentos, bem como da sua velocidade de liberação e

158 sua relação com a produtividade de eucalipto, indicam a capacidade de
159 fornecimento destes nutrientes pelos solos.

160 O estudo teve como objetivo avaliar os teores de K, Ca e Mg nos
161 compartimentos de reserva, não-trocável, trocável, disponível e a
162 velocidade de sua liberação, suas correlações e seus efeitos na
163 produtividade (incremento médio anual – IMA – de madeira) de plantios
164 de eucalipto, em sítios florestais cultivados no Estado do Rio Grande do
165 Sul.

166

167 **Material e métodos**

168 O estudo foi conduzido em amostras de solos obtidos de áreas
169 cultivadas comercialmente com *Eucalyptus* sp. localizadas na região das
170 províncias geomorfológicas da Depressão Periférica, Escudo Sul-
171 riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul,
172 pertencente à empresa CMPC Celulose Riograndense Ltda. Segundo a
173 classificação de Köppen (1931), o clima predominante na região é do tipo
174 Cfa, subtropical úmido. A precipitação média anual é de 1.500 mm com
175 as chuvas bem distribuídas durante todos os meses do ano (Fepagro,
176 2012). A vegetação natural da região é constituída pela mata subtropical
177 alta e mata subtropical arbustiva, sendo encontradas também áreas
178 ocupadas com pastagem, culturas anuais e plantios florestais. Para
179 realização do estudo, foram utilizados solos pertencentes a sete classes
180 distintas, descritas até o terceiro nível categórico (Quadro 1), conforme o
181 Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013).

182

183 **Quadro 1.** Classificação, símbolo e coordenadas geográficas dos solos coletados nas
 184 profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no
 185 estado do Rio Grande do Sul

Classificação dos solos	Símbolo	Coordenadas geográficas
Argissolo Vermelho distrófico	PVd	30°04'16,71''S ¹ – 51°45'47,72''O ²
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	PVAd	30°03'28,53''S – 51°46'10,27''O
Argissolo Amarelo distrófico	PAd	30°03'28,53''S – 51°45'40,00''O
Cambissolo Háptico eutrófico	CXve	30°30'59,07''S – 54°02'35,28''O
Neossolo Regolítico distrófico	RRd	30°31'22,41''S – 54°03'46,11''O
Chernossolo Argilúvico órtico	MTo	30°32'40,81''S – 54°02'34,67''O
Neossolo Quartzarênico órtico	RQo	30°24'00,00''S – 51°08'21,00''O

186 ¹ = Latitude Sul; ² = Longitude Oeste.

187

188 O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente
 189 casualizado, arrajado em esquema fatorial 7×2 (sete classes de solos \times
 190 duas profundidades), com cinco replicatas. Sendo os tratamentos
 191 constituídos de sete classes (Quadro 1) e duas profundidades (0,00-0,20 e
 192 0,20-0,40 m). A amostragem foi realizada em trincheiras abertas ao longo
 193 do perfil de cada classe de solo, onde foram obtidas amostras nas
 194 profundidades de 0,00-0,20 e de 0,20-0,40 m, sendo coletados
 195 aproximadamente 100 kg de solo em cada profundidade. Após a coleta, as
 196 amostras dos solos foram identificadas e transportadas para o
 197 Departamento de Ciência do Solo – DCS da Universidade Federal de
 198 Lavras – UFLA, onde foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em
 199 peneira de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA),
 200 acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas até o início da fase
 201 experimental. Para cada classe de solo, as amostras foram
 202 homogeneizadas e retirada uma sub amostra para caracterização química
 203 e granulométrica (Quadro 2).

204

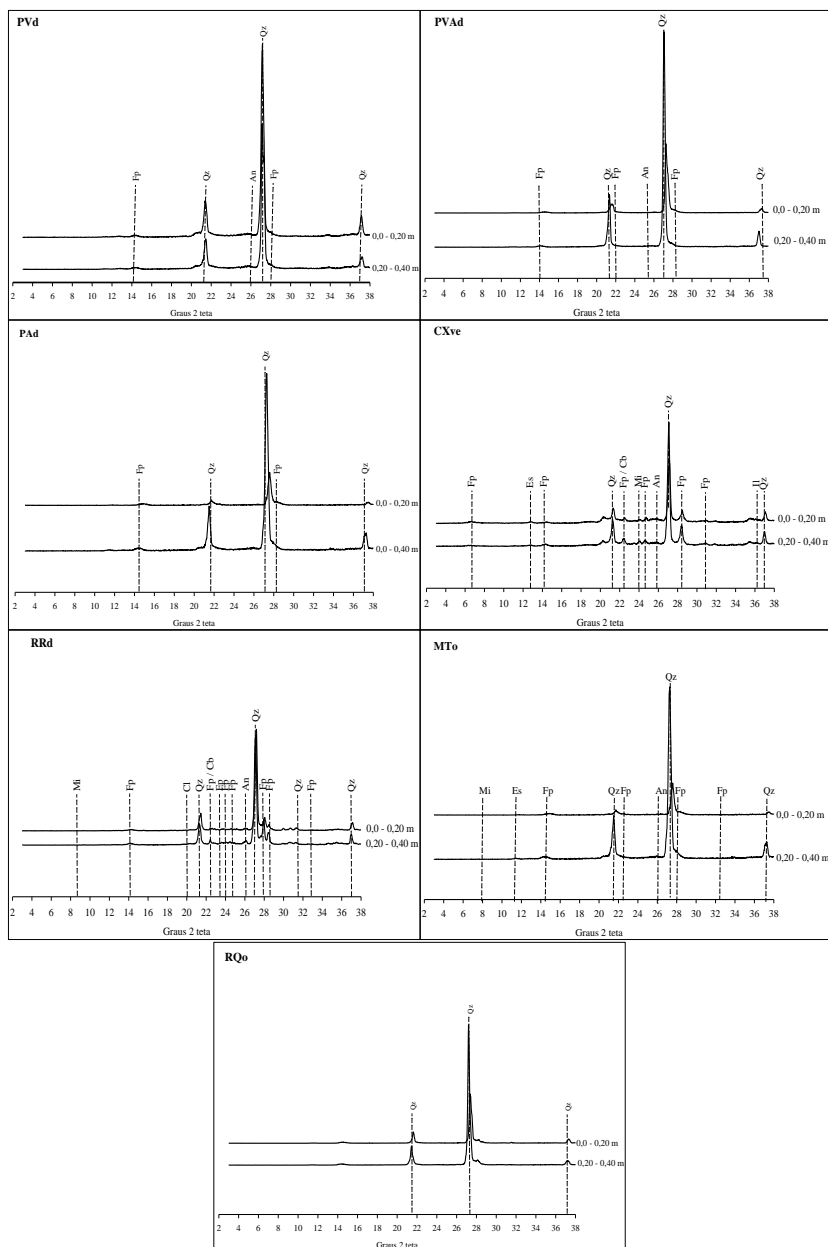
205 **Quadro 2.** Atributos químicos, relações Ca/Mg trocáveis e granulométricos em solos
 206 coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com
 207 eucalipto no estado do Rio Grande do Sul

Atributos	Unidades	Classes de solos						
		PVd	PVAd	PAd	CXve	RRd	MTo	RQo
----- 0 – 0,20 m -----								
pH	-	5,5	5,5	5,2	5,3	5,1	5,7	5,8
K	mg dm ⁻³	119,7	43,3	39,3	95,7	139,1	122,8	40,5
P	mg dm ⁻³	44,4	61,9	46,9	32,8	70,9	48,3	100,1
Ca	cmol _c dm ⁻³	1,9	0,9	1,3	3,3	0,7	4,3	0,6
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,7	0,6	0,6	4,0	0,5	1,6	0,2
SB	cmol _c dm ⁻³	5,1	3,1	2,9	6,2	1,9	10,9	1,0
T	cmol _c dm ⁻³	9,1	5,4	8,2	9,4	6,3	17,3	2,6
Ca/Mg	-	2,7	3,5	1,4	2,3	4,5	5,0	5,0
V	%	55,6	57,1	39,8	65,6	29,4	63,3	37,9
MOS	%	2,4	1,6	2	3,1	1,5	2,4	0,8
Argila	%	20	23	26	27	12	21	3,0
Silte	%	18	7	26	22	12	20	3,0
Areia	%	62	70	48	51	76	59	94
----- 0,20 – 0,40 m -----								
pH	-	5,8	5,7	4,9	5,9	5,3	5,4	4,9
K	mg dm ⁻³	49,1	34,8	27,2	52	118,9	98,7	35,4
P	mg dm ⁻³	52,9	62,5	58,6	60,6	79,7	53,1	93,2
Ca	cmol _c dm ⁻³	0,3	0,8	0,3	2,1	0,6	3,3	0,1
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,2	0,4	0,3	3,7	0,4	0,8	0,2
SB	cmol _c dm ⁻³	1,3	1,3	0,8	5,3	1,4	9,7	0,4
T	cmol _c dm ⁻³	13,2	6,1	9,9	10,2	4,5	18,4	1,8
Ca/Mg	-	4,8	2,7	3,5	1,4	2,3	4,5	5,0
V	%	13,2	22,1	7,7	52,4	31,9	52,9	22,5
MOS	%	1,6	1,2	1,2	1,6	1,6	1,6	0,3
Argila	%	23	22	26	27	15	18	3
Silte	%	20	10	29	29	13	22	3
Areia	%	57	68	45	44	72	60	94

208 pH: potencial hidrogeniônico em água na relação solo/solução de 1:2,5; K⁺: potássio
 209 disponível em Mehlich-1; Ca, Mg e Al trocáveis em cloreto de potássio (KCl 1,0 mol L⁻¹),
 210 SB: soma de base; T: capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V: percentual de
 211 saturação por bases; MOS: matéria orgânica do solo (oxidação em dicromato de sódio,
 212 conforme Walkler & Black, 1934).

214 Amostras das duas profundidades de cada classe de solo foram
 215 submetidas à difratometria de raios X – DRX (Figura 1). As análises
 216 foram realizadas pelo laboratório de mineralogia de solos do departamento
 217 de ciência do solo da escola Superior de Agricultura Luiz de Quiróz
 218 (ESALQ-USP). Foram utilizadas alíquotas da fração argila, para análise

219 de difração de Raio-X (DRX) pelo método do pó. O equipamento
220 utilizado foi um sistema Rigaku Miniflex II, radiação de $\text{CuK}\alpha$, operado a
221 30 kV e 15mA, com filtro de Ni e monocromador de grafite.



222 **Figura 1.** Difratoqramas de raios-X (DRX) em pó obtidos da fração argila das sete
 223 classes (PVd, PVAd, PAd, CXve, RRd, MTo e RQo) e duas profundidades (0,0 – 0,20 e
 224 0,20 – 0,40 m) dos solos estudados. Mi - mica, Qz - quartzo, An - anatásio, Fp -
 225 feldspato, Cb - cristobalita, Il - ilmenita e Es - esmectita.

226 Os teores de K, Ca e Mg no compartimento de reserva (R) foram
227 obtidos pela digestão sulfúrica, conforme Vettori (1969), descrito em
228 Embrapa (1997). Para extração, foi pesado 1g de TFSA, transferido para
229 erlenmeyer com capacidade para 500 mL, adicionado 20 mL de ácido
230 sulfúrico diluído na relação 1:1 e fervido durante 30 min. Após esfriar,
231 foram adicionados 50 mL de água destilada e procedeu-se a filtragem da
232 suspensão para balão volumétrico com capacidade para 250 mL, lavando
233 o resíduo com água até completar o volume.

234 Os teores não-trocáveis de K (K-NT), Ca (Ca-NT) e Mg (Mg-NT)
235 foram obtidos pela diferença entre os teores destes nutrientes
236 determinados em HNO₃ fervente e os teores determinados em cloreto de
237 amônio, uma vez que o HNO₃ fervente extrai as formas não-trocáveis
238 (Helmeke e Sparks, 1996) e o cloreto de amônio as formas trocáveis
239 destes nutrientes (Raij, 2001).

240 A determinação em ácido nítrico (HNO₃) fervente de K (K-AN), Ca
241 (Ca-AN) e Mg (Mg-AN), foi realizada conforme Knudsen (1982), sendo
242 inicialmente pesado 1 g de solo, transferido para erlenmeyer com
243 capacidade para 50 mL, adicionados três mL de ácido nítrico (HNO₃) na
244 concentração de 1 mol L⁻¹ e aquecido em areia a uma temperatura de 113
245 °C, permanecendo sob fervura durante 25 min. O extrato foi filtrado para
246 balão volumétrico com capacidade para 50 mL, em papel de filtragem
247 lenta, sendo o resíduo lavado com 4 mL de HNO₃ na concentração de 0,1
248 mol L⁻¹. Após a filtragem completa, o volume do balão foi completado
249 para 50 mL.

250 Os teores disponíveis K (K-T) e trocáveis de Ca (Ca-T) e Mg (Mg-
251 T) foram determinados conforme descrito em Coscione et al. (2001).

252 Inicialmente foram adicionados 5 cm³ de TFSA em frasco plástico,
253 acrescentado 50 mL de solução de cloreto de amônio (NH₄Cl) na
254 concentração de 1 mol L⁻¹. Os frascos foram tampados e agitados durante
255 5 min a 220 rpm. Após agitação, os frascos foram deixados em descanso
256 durante 12 h para decantação. No dia seguinte foram pipetadas as
257 alíquotas do sobrenadante necessárias às determinações.

258 Para extração de K disponível (K-D), foram empregados
259 procedimentos analíticos descritos em Embrapa (2009), sendo
260 inicialmente adicionados 10 cm³ de TFSA em erlenmeyer com
261 capacidade para 125 mL, acrescentados 100 mL de solução de Mehlich-1
262 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) e em seguida agitado durante
263 5 min em agitador circular horizontal. Após decantação durante 12 h foi
264 retirada uma alíquota de aproximadamente 20 mL do extrato para
265 determinação dos teores de K. Para extração de Ca e Mg trocáveis,
266 também foram empregados procedimentos analíticos detalhados em
267 Embrapa (2009), sendo adicionados 10 cm³ de TFSA em erlenmeyer com
268 capacidade para 125 mL, acrescentado 100 mL de solução de KCl na
269 concentração de 1 mol L⁻¹ e em seguida procedeu-se a agitação das
270 amostras por um período de tempo de cinco minutos em agitador circular
271 horizontal. Após agitação as amostras foram deixadas em repouso durante
272 12 h para decantação e no dia seguinte uma alíquota do extrato foi
273 retirada para realizar as determinações.

274 A cinética de liberação de K (K-CL), Ca (Ca-CL) e Mg (Mg-CL)
275 foi realizada conforme Sparks (1989). Sendo pesados 3 g de TFSA,
276 transferidos para tubos de centrífuga com capacidade para 50 mL e
277 adicionados 30 mL de ácido cítrico. As amostras foram deixados em

278 repouso durante os tempos de equilíbrio: 2, 8, 20, 55, 90, 148, 245, 403,
279 655, 1.096 e 1.808 horas. Após atingir cada tempo de equilíbrio, as
280 amostras foram centrifugadas a 3.200 g, durante 15 minutos e coletados o
281 sobrenadante.

282 Os teores de Ca e Mg foram aferidos separadamente no
283 sobrenadante, por espectrometria de absorção atômica e os teores de K
284 foram determinados em fotometria de chama. A estimação da cinética de
285 liberação de K, Ca e Mg foi realizada por meio de equações matemáticas,
286 empregando os modelos de ordem zero, primeira ordem, de Elovich e
287 parabólica de difusão, detalhadas em Sparks (1989).

288 As leituras dos teores de K foram determinados diretamente no
289 extrato sobrenadante obtido após extração pelos diferentes extratores,
290 sendo os teores deste nutriente quantificados em fotômetro de chama
291 (Pratt e Morse, 1954). As determinações dos teores de Ca e Mg foram
292 realizadas nos extratos obtidos pelos diferentes métodos de extração,
293 sendo inicialmente pipetado 1 mL do extrato para frasco com capacidade
294 para 25 mL e acrescentados 10 mL de solução de lantânio preparada na
295 concentração de 1 g L^{-1} , sendo as leituras realizadas em espectrofotômetro
296 de absorção atômica, com atomização por chama.

297 O incremento médio anual (IMA) volumétrico do *Eucalyptus* sp foi
298 fornecidos pela CMPC Celulose Riograndense (Quadro 3), sendo os
299 valores calculados em cinco parcelas de sítios florestais de cada uma das
300 sete classes de solo estudadas (Quadro 1). O espaçamento entre as plantas
301 em todas as parcelas foi de três metros entre plantas e três metros entre
302 linhas de plantio. O IMA de plantações florestais é uma medida que

303 expressa a média do crescimento total da árvore para uma determinada
304 idade, podendo ser calculado conforme descrito em Reatto et al. (1998).

305

306 **Quadro 3.** Médias e desvio padrão do incremento médio anual (IMA) volumétrico de
307 *Eucalyptus sp.* estimado para os sete anos de idade, em solos do Estado do Rio Grande
308 do Sul (dados fornecidos pela CMPC Celulose Riograndense).

Solos	IMA médio (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Desvio Padrão
PVd	47,68	0,68
PVAd	46,30	0,43
PAd	43,10	0,55
CXve	44,11	0,52
RRd	50,56	1,84
MTo	53,70	1,55
RQo	31,99	0,01

309 Média de quatro repetições.

310

311 Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo
312 teste F. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-
313 Knott, ao nível de 5 % de probabilidade. Quando houve interação
314 significativa entre classes e profundidades dos solos, foram desdobrados
315 as profundidades dentro de cada classe de solo. Todas as análises foram
316 realizadas com o auxílio do programa estatístico SISVAR 5.4 (Ferreira,
317 2014). As variáveis também foram submetidas às análises de
318 componentes principais (Principal Component Analysis – PCA) e de
319 correlação.

320

321 **Resultados e discussão**

322 Conforme os resultados da análise variância, todas as variáveis
323 apresentaram interações significativas entre as classes de solos e as
324 profundidades estudadas (Quadro 4). Os maiores teores de K, Ca e Mg
325 foram observados nos solos CXve, RRd e MTo (Quadro 4), nos

326 compartimentos de reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, K-
327 Ca e K-Mg), disponível (K-D) e trocável (Ca-T e Mg-T).

328

329 **Quadro 4.** Quadrado médio e teste de média para teores de K, Ca e Mg nos
330 compartimentos: reserva (R), não-trocável (NT), trocável (T) e disponível (D), em solos
331 coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com
332 eucalipto no estado do Rio Grande do Sul

Matriz de correlação		Compartimentos de K (mg dm ³)					
		K-R		K-NT		K-D	
		Soma de quadrados					
Solos (S)	6	28.922,415,9**		11.774,1**		14.402,7**	
Prof. (P)	1	108.209,4**		1.681,4**		12.099,3**	
S * P	6	4.381.484,4**		1.932,6**		1.390,8**	
erro	196	4.381,8		9,9		4,9	
CV		0,4		6,3		3,0	
Solos		Profundidades (m)		Profundidades (m)		Profundidades (m)	
		0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40
PVd		1.826,3 dA	1.708,2 dB	16,0 eB	37,1 dA	119,7 cA	49,1 dB
PVAd		1.133,2 eA	918,0 fB	12,7 eB	22,5 eA	43,3 eA	27,2 fB
PAd		884,8 fB	1.275,1 eA	19,4 dA	15,4 fA	39,3 dA	34,9 eB
CXve		4.339,6 aA	2.623,9 bB	70,4 cA	68,0 bA	95,8 cA	52,1 cB
RRd		2.826,9 cA	2.479,2 cB	88,6 bA	61,3 cB	139,1 bA	118,9 aB
MTo		4.087,6 bB	6.782,5 aA	108,0 aA	105,4 aA	122,9 aA	98,8 bB
RQo		754,4 gA	616,2 gB	67,7 cA	4,5 gB	40,5 fA	35,4 eB
Matriz de correlação		Compartimentos de Ca (mg dm ³)					
		Ca-R		Ca-NT		Ca-D	
		Soma de quadrados					
Solos (S)	6	3.375.176,90**		290.963,38**		657.176,34**	
Prof. (P)	1	519.406,97**		3.606,80**		449.766,53**	
S * P	6	144.766,88**		61.043,15**		35.158,74**	
erro	196	15.632,51		417,52		28,51	
CV		18,88		13,89		1,80	
Solos		Profundidades (m)		Profundidades (m)		Profundidades (m)	
		0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40
PVd		811,5 cA	156,2 dB	230,9 cA	54,8 cB	387,3 cA	58,1 fB
PVAd		479,0 dA	264,0 cB	143,2 cA	31,6 dB	180,9 eA	167,2 cB
PAd		462,3 dA	284,1 cB	105,9 dA	9,1 eB	264,6 dA	65,8 eB
CXve		1.359,4 bA	1.205,2 bA	415,0 aB	629,9 aA	670,6 bA	421,4 bB
RRd		325,0 eA	272,0 cA	33,1 eA	39,2 dA	149,9 fA	127,6 dB
MTo		1.619,4 aA	1744,2 aA	26,1 eB	241,9 bA	868,4 aA	659,8 aB
RQo		181,3 eA	106,2 dB	25,1 eB	73,3 cA	121,0 gA	20,8 gB
Matriz de correlação		Compartimentos de Mg (mg dm ³)					
		Ca-R		Ca-NT		Ca-D	
		Soma de quadrados					
Prof. (P)	1	17.645.919,46**		51.548,67**		246.041,79**	
S * P	6	2.520.316,42**		68.013,56**		23.950,84**	
erro	196	2.765.350,96**		36.870,56**		2.572,02**	
CV		65,69		88,59		15,02	
Solos		Profundidades (m)		Profundidades (m)		Profundidades (m)	
		0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40	0–0,20	0,2–0,40
PVd		624,3 cA	451,9 cB	16,5 eA	14,4 dB	81,3 cA	24,3fB

PVAd	271,7 dA	91,5 fB	57,4 dA	24,9 cB	67,7 eA	36,5eB
PAd	143,3 fB	253,9 eA	16,8 eA	14,1 dB	74,8 dA	48,1dB
CXve	992,3 bB	1.068,2 bA	380,7 aA	44,6 bB	483,3 aA	453,6 aB
RRd	186,3 eB	302,7 dA	70,9 cA	42,4 bB	64,3 eA	48,3 cB
MTo	2.416,4 aB	5.164,0 aA	95,8 bA	67,5 aB	191,6 bA	93,2 bB
RQo	110,9 gA	69,4 gB	9,8 eA	3,6 dB	24,3fA	24,3 fB

333 Letras minúsculas na coluna comparam solos e letras maiúsculas na linha comparam as
 334 profundidades, pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5 % de probabilidade.
 335

336 A superioridade dos teores de K, Ca e Mg nas duas profundidades
 337 dos solos CXve, RRd e MTo nos compartimentos de reserva, não-
 338 trocável, disponível e trocável (Quadro 4) resulta da presença de minerais
 339 fontes destes nutrientes, principalmente de feldspatos, micas e esmectitas
 340 (Figura 1). Estes minerais tendem a permanecer preservados nas frações
 341 areia e silte do solo (Bortoluzzi et al., 2005). No entanto, é necessário
 342 considerar que o teor de K, Ca e Mg nos compartimentos relatados pode
 343 variar em função da classe, profundidade, mineralogia, material de
 344 origem e grau de intemperismo dos solos (Castro et al., 2010; Alves et al.,
 345 2013).

346 O compartimento de K-R, Ca-R e Mg-R representa o reservatório
 347 destes nutrientes em longo prazo, sendo estes disponibilizados para
 348 solução na medida em que ocorrem alterações físicas e químicas nos
 349 minerais presentes no solo. Além disso, este compartimento pode ser um
 350 indicativo da capacidade potencial que um determinado solo possui para
 351 disponibilizar estes nutrientes para as plantas em longo prazo (Castilhos
 352 et al., 2002).

353 Vários estudos observaram que os maiores teores destes nutrientes
 354 no compartimento de reserva (Reatto et al., 1998; Silva et al., 2000; Villa
 355 et al., 2004; Castro et al., 2010; Staugaitis e Rutkauskienè, 2010; Marchi
 356 et al., 2012). No entanto, vale ressaltar que a proporção entre estes

357 compartimentos varia, principalmente, em função do material de origem,
358 do grau de desenvolvimento e da profundidade dos solos (Melo et al.,
359 2000; Melo et al., 2003; Martins et al., 2004; Castro et al., 2010; Alves et
360 al., 2013) e da mineralogia (Figura 1).

361 Todos os compartimentos de K, Ca e Mg presentes nos solos
362 representam importância para nutrição mineral de plantas. Sendo o
363 compartimento não-trocável de K, Ca e Mg um indicativo da capacidade
364 dos solos suprir estes nutrientes em médio prazo, podendo contribuir para
365 nutrição vegetal após cultivos sucessivos (Kaminski et al., 2007; Werle et
366 al., 2008).

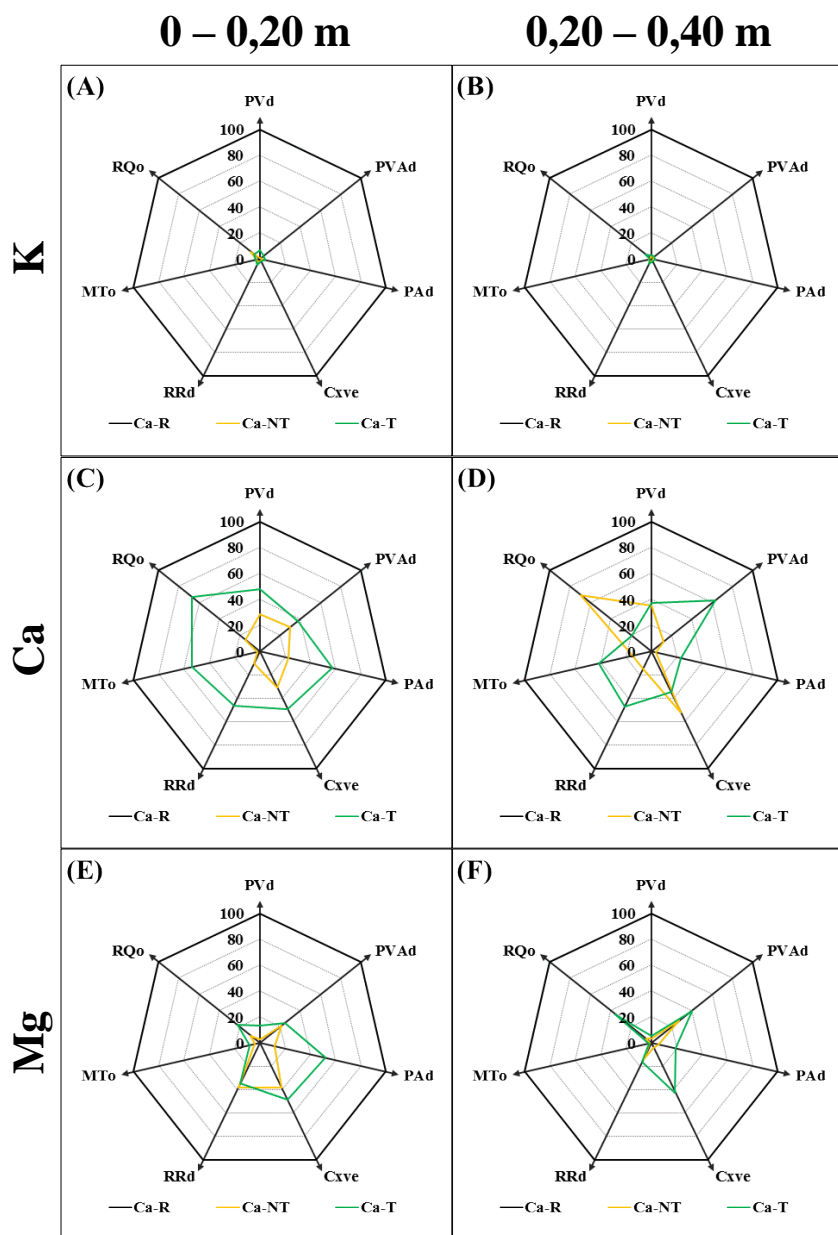
367 Já o compartimento disponível de K (K-D) e o trocável de Ca (Ca-
368 T) e Mg (Mg-T) são constituídos pela fração ligada eletrostaticamente às
369 cargas negativas de coloides orgânicos e inorgânicos dos solos (Ernani et
370 al., 2007), com disponibilidade imediata para as plantas. No entanto, o
371 compartimento K-D não é capaz de suprir a demanda das plantas em
372 médio e longo prazo (Kaminski et al., 2007; Fraga et al., 2009).

373 O percentual de K variou entre compartimentos e solos avaliados
374 (Figura 2 A e B), sendo os maiores percentuais deste nutriente observados
375 no compartimento K-R, tanto na profundidade de 0,00-0,20 m quanto na
376 profundidade de 0,20-0,40 m. Os demais compartimentos, em ambas as
377 profundidades, representam menos de 10 % da reserva de K em todos os
378 solos, as quais apresentam a seguinte ordem percentual decrescente: % K-
379 D > % K-NT.

380 A predominância de K no compartimento K-R pode estar
381 relacionada às formas estruturais deste nutriente nos solos, visto estas
382 formas tendem a ser preservadas em ambientes com predominância de

383 solos menos intemperizados. Segundo Sparks (2000) cerca de 98 % do K
384 total dos solos está associado a estrutura de minerais primários e
385 secundários. Além disso, na região de estudo, o fator clima apresenta
386 menor intensidade sobre o desenvolvimento dos solos.

387 O percentual de Ca variou entre os solos e os compartimentos
388 avaliados (Figura 2 C e D), sendo observado maior percentual deste
389 nutriente no compartimento CA-R, em ambas as profundidades estudadas.
390 Com exceção dos solos RQo e CXve na profundidade de 0,20 – 0,40 m,
391 a ordem decrescente média dos demais compartimentos de Ca foi a
392 seguinte: % Ca-NT > % Ca-T , nas duas profundidades estudadas. Em
393 todos os solos, o compartimento de Ca-T representa aproximadamente 50
394 % na profundidade de 0,00-0,20 m e 30 % na profundidade de 0,20-0,40
395 m, em relação ao Ca-R.



396

397

398

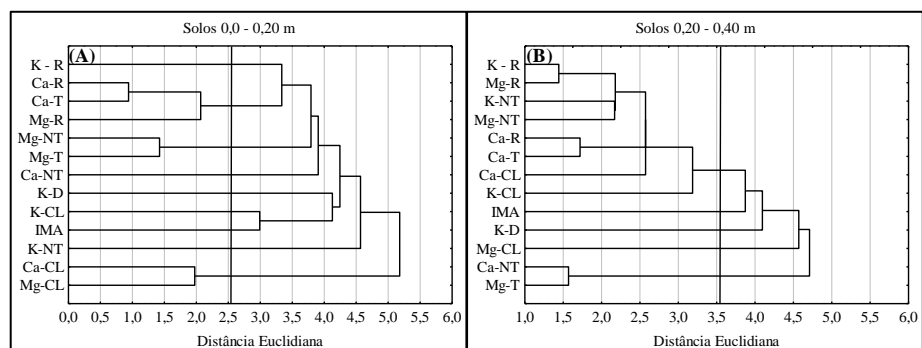
399

400

Figura 2. Percentuais de K (A e B), Ca (B e C) e Mg (E e F) nos compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul

401 O percentual de Mg variou entre os compartimentos e entre os
402 solos, expressando maior percentual no compartimento Mg-R, nas duas
403 profundidades estudadas (Figura 2 E e F). Para os demais
404 compartimentos, o percentual médio decrescente seguiu a ordem: % Mg-
405 T > % Mg-NT , em ambas as profundidades estudadas. A ocorrência de
406 teores de K-R, Ca-R e de Mg-R em grande percentual nestes
407 comportimentos evidenciam que um percentual bastante considerável
408 destes nutrientes está associado a formas estruturais de minerais micáceos
409 e feldspatos (Figura 1), os quais são dissovidos quando submetidos a
410 digestão em meio ácido (Melo et al., 2009), liberando teores
411 consideráveis destes nutrientes para solução.

412 Conforme apresentado pelo dendograma de similaridade, obtido
413 pela análise de *Cluster*, para os solos da profundidade de 0,00-0,20 m
414 (Figura 3 A), foram formados nove grupos, já na profundidade de 0,20 –
415 0,40 m (Figura 3 B) as variáveis estudadas formaram cinco grupos de
416 similaridade. A formação de maior número de grupos de variáveis na
417 profundidade de 0,0 – 0,20 m e menor na profundidade de 0,20 – 0,40 m,
418 indicam a existência de maior variabilidade na camada superficial em
419 relação a subsuperfície dos solos estudados.



420 **Figura 3.** Dendogramas de similaridade para os teores de K, Ca e Mg nos
 421 compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT),
 422 trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 –
 423 0,20 (A) e de 0,20 – 0,40 m (B) de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio
 424 Grande do Sul
 425

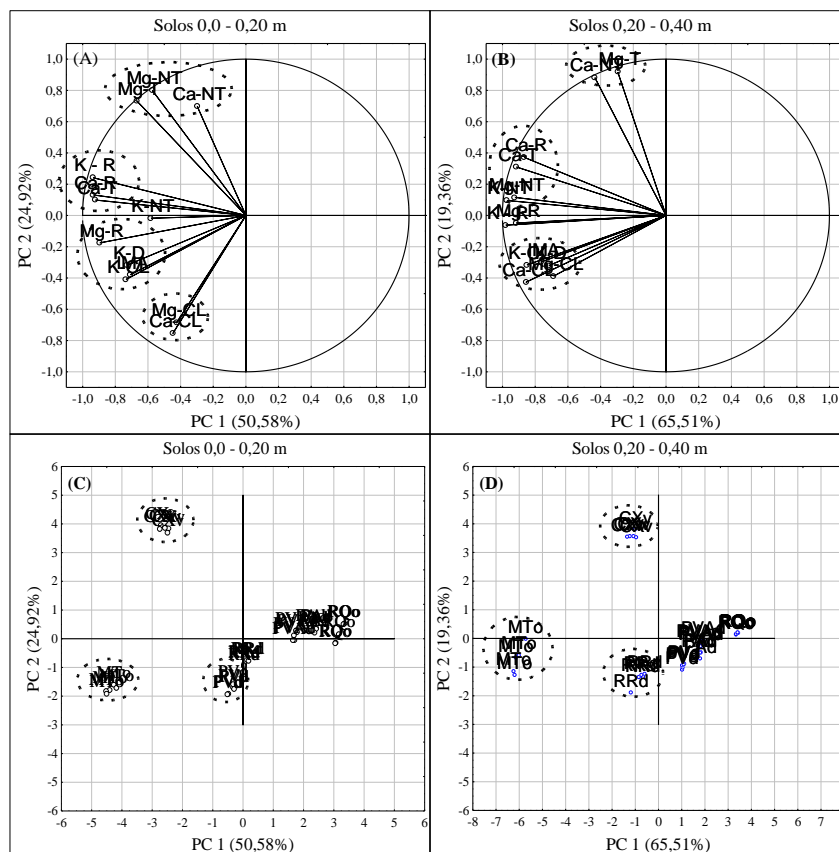
426 A presença do compartimento de Ca-R e Mg-R no mesmo grupo de
 427 similaridade na profundidade de 0,0 – 0,20 m e K-R e Mg-R na
 428 profundidade de 0,20 – 0,40 m (Figura 3B), evidencia que a reserva
 429 destes nutrientes nas respectivas profundidades é semelhante nos solos
 430 estudados. Já a ausência K-CL no grupo de similaridade formado pela Ca-
 431 CL e de Mg-CL na profundidade de 0,0 – 0,20 m demonstra que a
 432 liberação de Ca e Mg pelas reservas minerais dos solos ocorre em
 433 velocidades diferentes daquela observada para o K.

434 Considerando que o maior percentual dos teores de K, Ca e Mg se
 435 encontra no compartimento de reserva (Figura 2 A, B, C, D, E e F), pode-
 436 se inferir que os solos apresentam potencial para disponibilizar estes
 437 nutrientes para as plantas em longo prazo. Estudos realizados
 438 anteriormente, envolvendo estes mesmos solos e profundidades,
 439 confirmam a presença de maior percentual de K, Ca e Mg associado ao
 440 compartimento de reserva (Castro et al., 2010), o qual se apresentou

441 fortemente correlacionado com o incremento médio de eucalipto (IMA)
442 aos sete anos de idade (Amaral et al., 2015).

443 A análise de componentes principais dos compartimentos de K, Ca
444 e Mg e dos solos mostrou que as componentes PC1 e PC2 explicam 75,5
445 % da variação total nos solos da profundidade de 0,00-0,20 m (Figura 4 A
446 e B) e 84,87 % da variação total nos solos da profundidade de 0,20-0,40
447 m (Figura 4 C e D). Uma redução na dimensão de treze variáveis
448 estudadas para dois componentes principais é bastante valioso, pois,
449 promove uma simplificação da análise, sem ocorrer perda de informação
450 e explicando a variabilidade apresentada pelos dados originais (Andrade
451 et al., 2007).

452 A sobreposição das variáveis Ca-CL e Mg-CL, Ca-R e Ca-T e Ca-R
453 e Ca-T, nas duas profundidade estudadas (Figura 4 A e B), evidencia que
454 estas apresentam a mesma representatividade gráfica, o que pode ser
455 confirmado pelos resultados da análise de *Cluster*, onde apresentaram
456 uma grande similaridade em função de apresentarem a mesma distancia
457 Euclidiana (Figura 3 A e B). Nas duas profundidades avaliadas (Figura 4
458 A e C), o K-R, Ca-R, Mg-R e Mg-D se encontram bastante próximos ao
459 círculo unitário, indicando que estas variáveis contribuem mais
460 expressivamente para explicar a variação nos compartimentos de K, Ca e
461 Mg entre os solos estudados.



462 **Figura 4.** Distribuição dos compartimentos (A e B) e das classes de solos avaliadas (C e
 463 D) pela análise de componentes principais para os teores de K, Ca e Mg nos
 464 compartimentos: reserva (K-R, Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT),
 465 trocável (Ca-T e Mg-T) e disponível (K-D), em solos coletados nas profundidades de 0 –
 466 0,20 (A) e de 0,20 – 0,40 m (B) de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio
 467 Grande do Sul
 468

469 Nas duas profundidades, os solos MTo e RRd (Figura 4 C e D)
 470 expressaram maior influência na disposição das variáveis K-R, Ca-R, Mg-
 471 R, K-CL, Ca-CL, Mg-CL, K-D e K-NT. Já, o solo CXve demonstrou
 472 maior influência na disposição das variáveis Ca-NT e Mg-T, também em
 473 ambas as profundidades. Certamente, a disposição das variáveis
 474 apresentada, é uma consequência da maior proporção de K, Ca e Mg

475 presentes no compartimento de reserva, da maior cinética de liberação e
476 do maior percentual destes nutrientes no compartimento disponível e
477 trocável (Figura 2 A, B, C, D, E e F).

478 Provavelmente, o compartimento de reserva está associado com a
479 presença de minerais fontes de K, Ca e Mg, principalmente os feldspatos
480 e as micas (Figura 1), os quais ao sofrerem dissolução são liberados para
481 solução do solo, representando importantes fontes destes nutrientes para
482 as plantas (Reatto et al., 1998; Curi et al., 2005).

483 Todos os compartimentos de K e o incremento médio anual (IMA)
484 se correlacionaram de forma positiva nas duas profundidades, não sendo
485 observada correlação significativa apenas entre o compartimento K-NT,
486 Ca-NT e Mg-NT com o IMA na profundidade de 0,00-0,20 m, (Quadro
487 5). O IMA constitui um índice que estima a produtividade de um
488 determinada talhão (Reatto et al., 1998), podendo ser influenciado por
489 fatores como, por exemplo, o espessamento do plantio e disponibilidade
490 de nutrientes nos solos.

491 Castro et al (2010) e Amaral et al. (2015) avaliando características
492 químicas, mineralógicas e as reservas de K, Ca e Mg em solos obtidos
493 destas mesmas áreas, observaram maiores valores de IMA de eucalipto
494 em solos que possuem maiores proporções de minerais fontes de K, Ca e
495 Mg e maiores reservas destes nutrientes. Bortolon et al. (2010), ao
496 estudarem o K-D para as plantas, em solos da região Sul do Brasil,
497 também observaram correlações positivas e significativas entre os
498 compartimentos deste nutriente. Além disso, Medeiros et al. (2010)
499 avaliando extratores de K em solos com diferentes graus de

500 desenvolvimento no estado da Paraíba, também observaram correlações
501 positivas e significativas entre os compartimentos de K.

502

503 **Quadro 5.** Coeficientes de correlação de Pearson para os compartimentos: reserva (K-R,
504 Ca-R e Mg-R), não-trocável (K-NT, Ca-NT e Mg-NT), trocável (Ca-T e Mg-T),
505 disponível (K-D), cinética de liberação (K-CL, Ca-CL e Mg-CL), bem como o
506 incremento médio anual (IMA), em solos coletados nas profundidades de 0 – 0,20 e de
507 0,20 – 0,40 m de áreas cultivadas com eucalipto no estado do Rio Grande do Sul

Matriz de correlação	K-AN	K-NT	K-D	K-CL	IMA
	Compartimentos de K				
----- 0 – 0,20 m -----					
K-R	0,81**	0,69**	0,72**	0,61**	0,60**
K-NT			0,54**	0,45**	0,26 ^{ns}
K-D				0,62**	0,73**
K-CL					0,88**
----- 0,20 – 0,40 m -----					
K-R	0,86**	0,93**	0,68**	0,81**	0,70**
K-NT			0,76**	0,82**	0,76**
K-D				0,66**	0,68**
K-CL					0,78**
----- 0 – 0,20 m -----					
	Ca-AN	Ca-NT	Ca-T	Ca-CL	IMA
Compartimentos de Ca					
----- 0 – 0,20 m -----					
Ca-R	0,95**	0,42*	0,99**	0,37*	0,55**
Ca-NT			0,33 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Ca-T				0,38*	0,51*
Ca-CL					0,53*
----- 0,20 – 0,40 m -----					
Ca-R	0,90**	0,67**	0,96**	0,61**	0,47**
Ca-NT			0,65**	0,01 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Ca-D				0,65**	0,56**
Ca-CL					0,67**
----- 0 – 0,20 m -----					
	Mg-AN	Mg-NT	Mg-T	Mg-CL	IMA
Compartimentos de Mg					
----- 0 – 0,20 m -----					
Mg-R	0,37*	0,33 ^{ns}	0,46**	0,51**	0,57**
Mg-NT			0,97**	-0,29 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Mg-T				-0,15 ^{ns}	0,18 ^{ns}
Mg-CL					0,39*
----- 0,20 – 0,40 m -----					
Mg-R	0,24 ^{ns}	0,78**	0,14 ^{ns}	0,68**	0,56**
Mg-NT			0,40*	0,64**	0,76**
Mg-T				-0,13 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Mg-CL					0,70**

508 ns (não-significativo); * e ** (significativo a 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente).
509

510 Maiores coeficientes de correlação entre K-R, Ca-R e Mg-R e IMA
511 indicam que parte das demandas das plantações por estes nutrientes a
512 partir de suas reservas, principalmente até os 4,5 anos de idade das
513 plantas, onde as demandas por K, Ca e Mg são relativamente maiores
514 (Santana et al., 2008). Após esse período a ciclagem de nutrientes pela
515 serapilheira assume grande importância para o fornecimento de nutrientes
516 para as plantas (Cunha et al., 2005).

517 Conhecimentos sobre a variabilidade de reservas minerais e cinética
518 de liberação de K, Ca e Mg, em diferentes classes e profundidades de
519 solos, podem ser uma ferramenta auxiliar para realização de adequações
520 no manejo das adubações, especialmente na manutenção do balanço de
521 nutrientes nos solos destinados ao cultivo de espécies florestais, as quais
522 demandam maior tempo para atingir o período de colheita.

523

524

Conclusões

525 Os teores de K, Ca e Mg variaram entre os compartimentos e as
526 profundidades nas classes de solos estudadas, sendo que as maiores
527 proporções se encontram no compartimento de reserva, indicando a
528 importância deste compartimento para o suprimento destes nutrientes em
529 médio e longo prazo.

530 A grande maioria dos compartimentos de K, Ca e Mg apresenta
531 correlações significativas entre si, expressando a dependência que existe
532 entre os mesmos e evidenciando a importância da avaliação dos teores
533 destes nutrientes nos diferentes compartimentos para adequar o manejo
534 nutricional das plantas em cada classe de solo e para obtenção de

535 produções contínuas minimizando os impactos negativos ao meio
536 ambiente.

537 A produtividade (IMA) de madeira de eucalipto correlacionou-se de
538 forma positiva e significativa com os teores de K, Ca e Mg presentes nos
539 diferentes compartimentos, principalmente entre a reserva e a cinética de
540 liberação de K, Ca e Mg, nas duas profundidades, expressando a
541 importância destes para produção de árvores plantadas, especialmente
542 para as espécies vegetais de ciclo mais longo, onde sua liberação a médio
543 e longo prazos se torna importante.

544

545 **Agradecimentos**

546 Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento
547 Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do
548 Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de
549 Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio
550 financeiro.

551

552 **Referências**

553 Alves MJF, Melo VF, Reissmann CB, Kaseker JF. Reserva mineral de
554 potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L. Rev Bras Cienc
555 Solo. 2013; 37:1599-610. doi:10.1590/S0100-06832013000600016.

556 Amaral FHC, Furtini Neto AE, Curi N, Inda AV, Araújo EF.
557 Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a cinética de
558 liberação de macronutrientes. Sci For. 2015; 43:979-91.
559 doi:10.18671/scifor.v43n108.21.

- 560 Andrade EM, Araújo LFP, Rosa MF, Gomes RB, Lobato FAO. Fatores
561 determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto
562 Acaraú, Ceará, Brasil. *Cienc Rural*. 2007;37:1791-7. doi:10.1590/S0103-
563 84782007000600045.
- 564 Andrade MCN, Minhon MTA, Sansígolo CA, Zied DC, Sales-Campos C.
565 Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de
566 espécies e clones de eucalipto visando o cultivo de shiitake em toras. *Rev*
567 *Árvore*. 2011;35:183-92. doi:10.1590/S0100-67622011000200002.
- 568 Bortolon L, Gianello C, Schlindwein JA. Disponibilidade de potássio para
569 as plantas em solos do sul do Brasil estimada por métodos
570 multielementares. *Rev Bras Cienc Solo*. 2010;34:1753-61.
571 doi:10.1590/S0100-06832010000500027.
- 572 Bortoluzzi EC, Pernes M, Tessier D. Interestratificado caulinita-esmectita
573 em um Argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do Sul do
574 Brasil. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007;31:1291-300. doi:10.1590/S0100-
575 06832007000600008.
- 576 Bortoluzzi EC, Rheinheimer DS, Kaminski J, Gatiboni LC, Tessier D.
577 Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul
578 submetido à fertilização potássica. *Rev Bras Cienc Solo*. 2005;29:327-35.
579 doi:10.1590/S0100-06832005000300002.
- 580 Castilhos RMV, Meurer EJ. Suprimento de potássio de solos do Rio
581 Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. *Rev Bras Cienc Solo*.
582 2002;26:977-82. doi:10.1590/S0100-06832002000400015.

- 583 Castro PP, Curi N, Furtini Neto AE, Resende AV, Guilherme LRG,
584 Menezes MD, Araújo EF, Freitas DAF, Mello CR, Silva SHG. Química e
585 mineralogia de solos cultivados com eucalipto (*Eucalyptus sp.*). Sci For.
586 2010;38:645-57.
- 587 Coscione AR, Andrade, JC, Raij Bvan, Abreu MF, Cantarella H.
588 Determinação de alumínio, cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis
589 em extrato de cloreto de amônio. In Raij Bvan, Andrade JC, Cantarella H,
590 Quaggio JA. Análise química para avaliação da fertilidade de solos
591 tropicais. Campinas: Instituto Agronômico; 2001.
- 592 Cunha GDM, Gama-Rodrigues ACD, Costa GS. Ciclagem de nutrientes
593 em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense. Rev
594 *Árvore*. 2005;29:353-63.
- 595 Curi N, Kampf N, Marques JJ. Mineralogia e formas de potássio em solos
596 brasileiros. In: Yamada T, Roberts TL, editores. Potássio na agricultura
597 brasileira. Piracicaba: Potafos; 2005. p. 71-91.
- 598 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Manual de
599 análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília:
600 Informação Tecnológica; 2009.
- 601 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Manual de
602 métodos e análise de solo. 2ed. Rio de Janeiro: CNPS; 1997.
- 603 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Sistema
604 Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª ed. Brasília, DF: CNPS; 2013.

- 605 Ernani PR, Almeida JÁ, Santos FC. Potássio. In: Novais RF, Alvarez
606 VVH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores.
607 Fertilidade do solo. Viçosa, MG: SBCS; 2007. p.551-94.
- 608 Faria GE, Barro NF, Novais RF, Lima JC, Teixeira JL. Produção e estado
609 nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação,
610 em resposta à adubação potássica. Rev Árvore. 2002;26:577-84.
611 doi:10.1590/S0100-67622002000500008.
- 612 Ferreira DF. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple
613 comparisons. Cienc Agrotec. 2014;38:109-12. doi: 10.1590/S1413-
614 70542014000200001.
- 615 Fraga TI, Genro Junior AS, Inda AV, Anghinoni I. Suprimento de
616 potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz
617 irrigado. Rev Bras Cienc Solo. 2009;33:497-506. doi: 10.1590/S0100-
618 06832009000300003.
- 619 Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Sul -
620 Fepagro. Atlas climático: Rio Grande do Sul. Porto Alegre; 2012.
- 621 Helmeke PA, Sparks DL. Litio, sódio, potássio , rubídio e céσιο . In:
622 Sparks DL, Page AL, Helmeke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN,
623 Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME, editors. Methods of soil
624 analysis chemical methods; Pt 3. Madison: American Society of
625 Agronomy; 1996. p. 551-74.

- 626 Industria Brasileira de Árvores - IBA. Relatório IBÁ 2015: ano base
627 2014. Brasília, DF: 2015. [acesso em 21 janeiro 2016]. Disponível em:
628 http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf.
- 629 Kaminski J, Brunetto G, Moterle DF, Rheinheimer DS. Depleção de
630 formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. Rev Bras
631 Cienc Solo. 2007;31:1003-10. doi: 10.1590/S0100-06832007000500017.
- 632 Knudsen D, Deterson GA, Pratt PF. Lithium, sodium and potassium. In:
633 Black CA, Gvans DD, White JL, Ensminger LE, Clark FE, editors.
634 Methods of soil analysis; Pt 2. Madison: American Society of Agronomy;
635 1982. p.225-246.
- 636 Köppen W. Grundriss der klimakunde. Berlin: W. Guyter; 1931.
- 637 Marchi G, Silva VA, Guilherme LRG, Lima JM, Nogueira FD,
638 Guimaraes PTG. Potassium extractability from soils of Brazilian coffee
639 regions. Biosci J. 2012;28:913-9.
- 640 Martins R, Melo VF, Monte Serrat B. Métodos de determinação da
641 disponibilidade de potássio para a cultura do trigo em solos dos Campos
642 Gerais, Estado do Paraná. Rev Ceres. 2004;51:787-801.
- 643 Medeiros JS, Oliveira FHT, Arruda JA, Vieira MS, Fontes MP.
644 Efficiency of available potassium extractants in soils of Paraíba State with
645 different degrees of pedogenetic development. Rev Bras Cienc Solo.
646 2010;34:183-94. doi:10.1590/S0100-06832010000100019.

- 647 Melo VF, Castilhos RMV, Pinto LFS. Reserva mineral do solo. In: Melo
648 VF, Alleoni LRF, editores. Química e mineralogia do solo; parte I –
649 conceitos básicos. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo;
650 2009. p.251-332.
- 651 Melo VF, Corrêa GF, Maschio PA, Ribeiro NA, Lima VC. Importância
652 das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do
653 Triângulo Mineiro. Rev Bras Cienc Solo. 2003;27:807-19.
654 doi:10.1590/S0100-06832003000500005.
- 655 Melo VF, Novais RF, Fontes MPF, Schaefer CEGR. Potássio e magnésio
656 em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. Rev Bras Cienc
657 Solo. 2000;24:269-84. doi:10.1590/S0100-06832000000200004.
- 658 Oliveira IA, Campos MCC, Freitas L, Soares MDR. Caracterização de
659 solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. Acta Amaz.
660 2015;45:1-12. doi:10.1590/1809-4392201400555.
- 661 Pratt PF, Morse HH. Potassium release from exchangeable and non
662 exchangeable forms in Ohio soils. Ohio: Ohio Agricultural Experiment
663 Station Research Bulletin; 1954. 747p.
- 664 Raij B Van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. Análise química para
665 avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto
666 Agrônômico, 2001. 284p.
- 667 Reatto A, Fontes MPF, Alvarez VVH, Resende M, Ker JC, Costa LM.
668 Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade

- 669 agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do Vale do Rio
670 Doce (MG). Rev Bras Cienc Solo. 1998;22:255-66. doi:10.1590/S0100-
671 06831998000200011.
- 672 Santana RC, Barros NF, Novais RF, Leite HG, Comerford NB. Alocação
673 de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. Rev Bras Cienc Solo.
674 2008;32:2723-33. doi:10.1590/S0100-06832008000700016.
- 675 Schumacher M, Caldeira MVM. Estimativa da biomassa e do conteúdo de
676 nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-
677 especie maidenii. Cienc Flor. 2001;11:45-53.
- 678 Silva DN, Meurer E, Kampf N, Borket CM. Mineralogia e formas de
679 potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a
680 disponibilidade para as plantas. Rev Bras Cienc Solo. 1995;19:433-9.
- 681 Silva IR, Furtini Neto AE, Fernandes LA, Curi N, Vale FR. Formas,
682 relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em
683 diferentes Latossolos. Pesq Agropec Bras. 2000;35:2065-73.
684 doi:10.1590/S0100-204X2000001000019.
- 685 Song SK, Huang PM. Dynamics of potassium release from potassium-
686 bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. Soil Sci Soc Am
687 J. 1988;52:383-90. doi:10.2136/sssaj1988.03615995005200020015x.
- 688 Sparks DL. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER ME, editor.
689 Handbok of soil science. Boca Raton: CRC Press; 2000.
- 690 Sparks DL. Kinetics of soil chemical processes. Davis: Academic; 1989.

- 691 Staugaitis G, Rutkauskienė R. Comparison of magnesium determination
692 methods as influenced by soil properties. *Zemdirbyste*. 2010;97:105-16.
- 693 Vettori L. Métodos de análise do solo. Rio de Janeiro: Equipe de
694 Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. (Boletim Técnico, 7).
- 695 Villa MR, Fernandes LA, Faquin V. Formas de potássio em solos de
696 várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. *Rev Bras Cienc Solo*.
697 2004;28:649-58. doi:10.1590/S0100-06832004000400007.
- 698 Werle R, Garcia RA, Rosolem CA. Lixiviação de potássio em função da
699 textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Rev Bras Cienc Solo*.
700 2008;32:2297-305. doi:10.1590/S0100-06832008000600009.

**ARTIGO 2 CRESCIMENTO, NUTRIÇÃO E FISIOLOGIA DE
EUCALIPTO EM SOLOS COM DIFERENTES COMPARTIMENTOS
DE K, CA E MG**

Artigo formatado de acordo com as Normas da Revista **Scientia Forestalis**.

(VERSÃO PRELIMINAR)

1 **Crescimento, nutrição e fisiologia de eucalipto em solos com**
2 **diferentes compartimentos de K, Ca e Mg**

3
4 GROWTH, NUTRITION AND PHYSIOLOGY OF EUCALYPTUS IN
5 SOILS WITH DIFFERENT COMPARTMENTS OF K, CA AND MG

6
7 Francisco Hécio Canuto Amaral¹, Antonio Eduardo Furtini Neto²,
8 Alberto Vasconcellos Inda³, Elias Frank de Araújo⁴ & Nilton Curi⁵

9
10 ¹Doutorando em Ciência do Solo. UFLA – Universidade Federal de
11 Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-000 – Lavras, MG. E-mail:
12 helcioagro@gmail.com;

13 ²Pesquisador. – ITV DS – Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento
14 Sustentável. Rua Boaventura da Silva – de 415/416 a 1147/1148 – Nazaré
15 - 66055-090 – Belém, PA. E-mail: antonio.furtini@itv.org;

16 ³Professor Associado do Departamento de Solos. Universidade Federal do
17 Rio Grande do Sul / Faculdade de Agronomia. Caixa Posta, 15100 - Av.
18 Bento Gonçalves, 7712 – 90001-970 – Porto Alegre, RS. E-mail:
19 alberto.inda@ufrgs.br;

20 ⁴Engenheiro Florestal. CMPC Celulose do Brasil Ltda. E-mail:
21 efaraujo@cmpcrs.com.br

22 ⁵Professor Titular do Departamento de Ciência do Solo. UFLA -
23 Universidade Federal de Lavras. Caixa Postal, 3037 – Centro – 37200-
24 000 – Lavras, MG. E-mail: niltcuri@dcs.ufla.br.

25

26 **Resumo**

27 A silvicultura representa uma atividade estratégica para geração e
28 manutenção de empregos, de renda e de arrecadação de tributos no Brasil,
29 favorecendo o desenvolvimento econômico, social e sustentável do
30 agronegócio brasileiro. Os plantios são encontrados em todas as regiões
31 brasileiras, sendo que no sul do país as plantações são realizadas em solos
32 com potenciais variados de suprir nutrientes às plantas a partir de suas
33 reservas minerais. O estudo teve como objetivos avaliar o dcrescimento
34 inicial, a nutrição e aspectos fisiológico de plantas de eucalipto,
35 cultivadas com e sem a adição de fontes minerais de potássio (K), cálcio
36 (Ca) e magnésio (Mg), em solos obtidos de sítios florestais localizados
37 nas províncias geomorfológicas da Depressão Periférica, Escudo Sul-
38 riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul. Foram

39 avaliadas em condições controladas, variáveis de crescimento, aspectos
40 nutricionais, taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração das plantas (E)
41 crescidas em solos distintos. Plantas cultivadas em solos que possuem
42 maiores reservas, disponibilidade e cinética de liberação de K, Ca e Mg,
43 apresentaram altura (H), diâmetro de caule (DC) e matéria seca de parte
44 aérea (MSR) similares, com ou sem adubação com K, Ca e Mg. As
45 plantas apresentaram maior teor foliar e acúmulo de K em todos os solos
46 adubados com K, Ca e Mg. No entanto, a eficiência de uso deste nutriente
47 foi superior em plantas cultivadas em solos sem adubação. A adubação
48 com K, Ca e Mg promoveu redução na taxa fotossintética (A) e taxa de
49 transpiração de plantas cultivadas em solos que possuem menores
50 reservas e disponibilidade destes nutrientes.

51

52 **Palavras-chave:** Nutrição e fisiologia vegetal, Atividade florestal,
53 Floresta plantada, Eucaliptocultura.

54

55 **ABSTRACT**

56 Forestry represents a strategic activity for generating and maintaining
57 employments, income and tax collection in Brazil, favoring economic,

58 social and sustainable development of Brazilian agribusiness. The
59 plantations can be found in all regions of Brazil, being that in the south of
60 the country, plantations are done in soils with varied potentials of
61 supplying nutrients to the plants from its mineral reserves. The study had
62 the objective of evaluating the initial growth, nutrition and physiological
63 aspects of eucalyptus plants cultivated with and without the addition of
64 mineral sources of potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) to
65 soils obtained from forest sites located in the geomorphometric provinces
66 of the Periphery Depression, Sul-riograndense Shield and Costal Plain of
67 the State of Rio Grande do Sul. We evaluated the growth variables,
68 nutritional aspects, photosynthetic rate (A) and plant transpiration rate (E)
69 of plants grown in distinct soils, under controlled conditions. Plants
70 cultivated in soils presenting larger reserves, availability and kinetic
71 release of K, Ca and Mg, presented similar height (H), stem diameter
72 (SD) and shoot dry matter (SDM), with or without fertilization with K, Ca
73 and Mg. The plants presented higher leaf content and accumulation of K
74 in all soils fertilized with K, Ca and Mg. However, the efficiency of the
75 use of this nutrient was superior in plants cultivated in soils with no
76 fertilization. Fertilization with K, Ca and Mg promoted the decrease in

77 photosynthetic rate (A) and transpiration rate of plants cultivated in soils
78 presenting smaller reserves and availability of these nutrients.

79 Keywords: Plant nutrition and physiology, forestry activity, planted
80 forest, eucalyptus culture.

81

82 **INTRODUÇÃO**

83 A eucaliptocultura representa uma atividade estratégica para o
84 desenvolvimento social, econômico e sustentável do agronegócio
85 brasileiro, tendo despertado interesse de diversos segmentos que atuam na
86 cadeia produtiva de árvores plantadas, principalmente os da prestação de
87 serviços, da indústria e do fornecimento de insumos. No entanto, a
88 produção de madeira pelas florestas plantadas resulta, dentre outros
89 fatores, de complexos mecanismos bioquímicos, fisiológicos e da
90 eficiência das plantas converterem radiação solar e CO₂ em biomassa
91 vegetal, os quais são influenciados, principalmente, pela disponibilidade
92 de água e de nutrientes (SANTANA et al., 2008).

93 Entre os nutrientes, o K, o Ca e o Mg são demandados em maiores
94 quantidades pelo eucalipto (ANDRADE et al., 2011). A obtenção de
95 produtividades florestais economicamente viáveis depende de diversos
96 fatores, como reservas minerais, os quais constituem fontes de nutrientes

97 (CASTRO et al., 2010; ALVES et al., 2013; AMARAL et al., 2015),
98 balanço de nutrientes no sistema solo-planta (SANTANA et al., 2008),
99 capacidade das plantas absorverem e utilizarem os nutrientes (AMARAL
100 et al., 2011), bem como a eficiência dos processos fisiológicos das plantas
101 para produção de biomassa.

102 O conhecimento da eficiência de utilização de nutrientes e de
103 processos fisiológicos pelas plantas é importante e pode auxiliar na
104 escolha da espécie e no manejo florestal para determinados solos e
105 regiões (CALDEIRA et al., 2004), permitindo planejar as plantações
106 conforme o potencial de fertilidade dos solos (LIMA et al., 2005) e a
107 obtenção de produções sustentáveis, sobretudo, em condições de baixa
108 disponibilidade de nutrientes nos solos (FARIA et al., 2008).

109 Características químicas e mineralógicas dos solos, cinética de
110 liberação de macronutrientes pelas reservas minerais, eficiência de
111 utilização de nutrientes e a fisiologia, estão direta e indiretamente
112 associados ao crescimento e produtividade das plantações de eucaliptos.
113 Castro et al. (2010) avaliando os atributos químicos e mineralógicos de
114 solos cultivados com eucalipto observaram que o incremento médio anual

115 (IMA) variou em função dos teores totais de Ca e Mg e da mineralogia de
116 solos distintos.

117 Amaral et al. (2015) verificaram que a produtividade de sítios
118 florestais cultivados com eucalipto está correlacionada com a cinética de
119 liberação de K, Ca e Mg pelas reservas minerais dos solos. Estudos
120 realizados por Lima et al. (2005) e Faria et al. (2008) observaram
121 existência de variações na produtividade, no conteúdo e na eficiência de
122 utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* sp.

123 Segundo Caldeira et al. (2004), o conhecimento sobre a eficiência
124 de utilização de K, Ca e Mg em espécies ou clones florestais é de grande
125 importância prática, principalmente no momento da escolha do material a
126 ser utilizado nos plantios florestais. Estudos que abordam as
127 características dos solos, aspectos nutricionais e fisiológicos do eucalipto
128 compreendem inovações científicas que podem auxiliar pesquisadores e
129 técnicos na indicação do manejo nutricional de florestas plantadas de
130 forma racional.

131 Diante do exposto, o estudo teve como objetivos avaliar o
132 crescimento inicial, a nutrição e aspectos fisiológico de plantas de
133 eucalipto, cultivadas com e sem a adição de fontes minerais de potássio

134 (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), em solos obtidos de sítios florestais
135 localizados nas províncias geomorfológicas da Depressão Periférica,
136 Escudo Sul-riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio Grande do
137 Sul.

138

139 **MATERIAL E MÉTODOS**

140 O estudo foi conduzido no Departamento de Ciência do Solo
141 (DCS) da Universidade de Federal de Lavras (UFLA), Lavras – Minas
142 Gerais, sob condições de casa de vegetação. As plantas foram cultivadas
143 em solos obtidos de áreas cultivadas comercialmente com *Eucalyptus* sp,
144 localizadas na região das províncias geomorfológicas da Depressão
145 Periférica, Escudo Sul-riograndense e Planície Costeira do Estado do Rio
146 Grande do Sul, pertencente à Celulose Riograndense Ltda - CMPC. Os
147 solos foram classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação
148 de Solos, sendo as classes descritas até o terceiro nível categórico
149 (EMBRAPA, 2013) e os dados de incremento médio anual de eucalipto
150 cedidos pela CMPC (Tabela 1).

151

152 **Tabela 1.** Classificação, símbolo, coordenadas geográficas e incremento
 153 médio anual (IMA) de madeira de eucalipto dos solos utilizados no
 154 experimento.

155 **Table 1.** Classification, symbol and geographic coordinates of the soils
 156 used in the experiment.

Classificação dos solos	Símbolo	Coordenadas geográficas		IMA ¹
		Latitude Sul	Longitude Norte	
Argissolo Vermelho distrófico	PVd	30°04'16,71"	51°45'47,72"	47,68
Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	PVAd	30°03'28,53"	51°46'10,27"	46,30
Argissolo Amarelo distrófico	PAd	30°03'28,53"	51°45'40,00"	43,10
Cambissolo Háplico eutrófico	CXve	30°30'59,07"	54°02'35,28"	44,11
Chernossolo Argilúvico órtico	MTo	30°32'40,81"	54°02'34,67"	50,56
Neossolo Regolítico distrófico	RRd	30°31'22,41"	54°03'46,11"	53,70
Neossolo Quartzarênico órtico	RQo	30°24'00,00"	51°08'21,00"	31,99

157 ¹Média de quatro repetições.

158

159 Na região onde foram coletadas as amostras, predomina o clima
 160 do tipo Cfa, subtropical úmido (KÖPPEN, 1931). Segundo a FEPAGRO
 161 (1973), a precipitação média anual é de 1.500 mm, com chuvas bem
 162 distribuídas durante todos os meses do ano. Os solos empregados no
 163 estudo foram coletados na profundidade de 0 – 0,20 m, em trincheiras
 164 abertas em perfil representativo de cada classe de solo. Para cada classe
 165 de solo foi retirada uma alíquota para realização da caracterização dos
 166 seus atributos (Tabela 2).

167

168 **Tabela 2.** Atributos químicos, cinética de liberação de K, Ca e Mg e
 169 granulométricos na profundidade de 0 – 0,20 m de sete classes de solos
 170 utilizadas no estudo.

171 **Table 2.** Chemical, release kinetics of K, Ca and Mg and particle size
 172 distribution properties at the 0 – 0,20 m depth of seven soil classes used
 173 in the study.

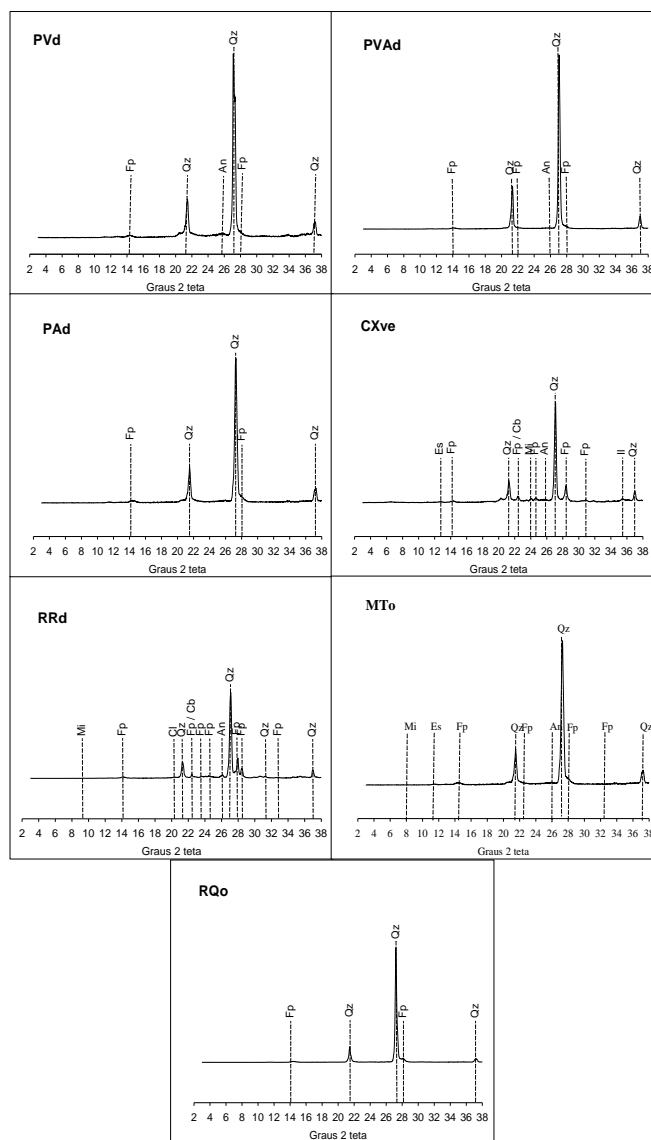
Atributos	Unidades	Classes de solos						
		PVd	PVAd	PAd	CXve	RRd	MTo	RQo
		----- 0 – 0,20 m -----						
pH	-	5,5	5,5	5,2	5,3	5,1	5,7	5,8
K	mg dm ⁻³	119,7	43,3	39,3	95,7	139,1	122,8	40,5
K*	mg dm ⁻³	121,2	93,3	81,6	105,2	162,0	140,4	102,8
P	mg dm ⁻³	44,4	61,9	46,9	32,8	70,9	48,3	100,1
Ca	cmol _c dm ⁻³	1,9	0,9	1,3	3,3	0,7	4,3	0,6
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,7	0,6	0,6	4,0	0,5	1,6	0,2
Ca*	cmol _c dm ⁻³	4,2	3,1	2,8	8,2	1,9	4,7	1,6
Mg*	cmol _c dm ⁻³	0,9	0,8	1,0	4,1	0,7	1,7	0,4
SB	cmol _c dm ⁻³	5,1	3,1	2,9	6,2	1,9	10,9	1,0
T	cmol _c dm ⁻³	9,1	5,4	8,2	9,4	6,3	17,3	2,6
V	%	55,6	57,1	39,8	65,6	29,4	63,3	37,9
%K ¹	%	3,4	2,1	1,2	2,6	5,7	1,8	4,0
%Ca ¹	%	20,9	16,7	15,9	35,1	11,1	24,9	23,1
%Mg ¹	%	7,7	11,1	7,3	42,6	7,9	9,2	7,7
Ca-T/Mg-T	-	2,7	3,5	1,4	2,3	4,5	5,0	5,0
MOS	%	2,4	1,6	2	3,1	1,5	2,4	0,8
K-R	mg dm ⁻³	1.826,3	1.133,2	884,8	4.339,6	2.826,9	4.087,6	754,4
Ca-R	cmol _c dm ⁻³	4,1	2,4	2,3	6,8	1,6	8,1	0,9
Mg-R	cmol _c dm ⁻³	5,1	2,2	1,2	8,2	1,5	19,9	0,9
K-Cl	mg dm ³ há ¹	5,8	7,9	3,6	5,4	8,0	11,9	2,1
Ca-Cl	mg dm ³ há ¹	5,7	1,3	1,5	0,7	2,2	4,4	1,2
Mg-Cl	mg dm ³ há ¹	6,6	1,3	0,9	0,7	1,3	5,3	1,9
Argila	%	20	23	26	27	12	21	3,0
Silte	%	18	7	26	22	12	20	3,0
Areia	%	62	70	48	51	76	59	94

174 *Teores dos nutrientes após adubação dos solos com K, Ca e Mg; ¹%
 175 destes nutrientes em relação a capacidade de troca de cátions a pH 7; K-
 176 R, Ca-R e Mg-R determinados conforme Vettori (1969); K-D, Ca-T e
 177 Mg-T determinados conforme descrito em Embrapa (2009); K-CL, Ca-

178 CL e Mg-CL determinados conforme Sparks (1989), sendo os valores
179 obtidos de Amaral et al. (2015).

180

181 Amostras de cada classe de solo foram submetidas à difratometria
182 de raios-X - DRX (Figura 1). As análises foram realizadas no laboratório
183 de Mineralogia de Solos do Departamento de Ciência do Solo da Escola
184 Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ-USP). Foram
185 utilizadas alíquotas de argila, para análise de difração de raio-X (DRX)
186 pelo método do pó. O equipamento utilizado foi um sistema Rigaku
187 Miniflex II, radiação de $\text{CuK}\alpha$, operado a 30 kV e 15mA, com filtro de Ni
188 e monocromador de grafite.



189 **Figura 1.** Difratomogramas de raios-X (DRX) em pó obtidos da fração argila das
 190 sete classes dos solos (PVd, PVAd, PAd, CXve, RRd, MTo e RQo), na
 191 profundidade de 0,0 – 0,20 m. Mi - mica, Qz - quartzo, An - anatásio, Fp -
 192 feldspato, Cb - cristobalita, Il - ilmenita e Es - esmeclita.

193 **Figure 1.** X-ray diffraction (DRX) in powder samples from the clay
194 fraction of the seven soil classes (PVd, PVAd, DBP, CXve, RRD, MTO
195 and RQo) at the depth of 0.0 to 0.20 m. Mi - mica, Qz - quartz, An -
196 anatase, Fp - feldspar, Cb - cristoballite, Il - ilmenite and Es - smectite.

197

198 Para avaliar a relação dos diferentes compartimentos de K, Ca, Mg
199 e da cinética de liberação destes nutrientes pelos solos sobre o
200 desenvolvimento inicial, nutrição mineral e atributos fisiológicos das
201 plantas, foram cultivados clones de eucalipto em vasos, sendo os clones
202 de eucalipto cultivados de julho de 2014 até janeiro de 2015,
203 compreendendo um período de seis meses. As mudas utilizadas foram
204 obtidas de clonagem de espécie *Eucalyptos urophylla*, e comercializadas
205 pela empresa Bela Vista Florestal sob o código AEC 1528.

206 Os tratamentos foram constituídos de sete classes de solos e de
207 dois níveis de adubação (com e sem adição de K, Ca e Mg), arranjado em
208 um esquema fatorial (7 x 2), utilizando-se o delineamento inteiramente
209 casualizado com cinco repetições e uma planta por vaso. O suprimento de
210 K (300 mg dm⁻³), Ca (75 mg dm⁻³) e Mg (75 mg dm⁻³) foi realizado via
211 solução, segundo sugestão de Malavolta (1980).

212 Para instalação do ensaio, inicialmente, foram transferidos três
213 dm^3 de solo (passado em peneira de 2 mm) para vasos de polipropileno,
214 os micronutrientes e macronutrientes foram adicionados via solução,
215 conforme recomendação proposta por Malavolta (1980), empregando as
216 fontes apresentadas na Tabela 3. Os solos foram incubados durante um
217 período de 15 dias antes do transplântio das mudas, para reação e
218 distribuição homogênea dos nutrientes no solo.

219 O suprimento de N e de K foi parcelado em quatro aplicações de
220 75 mg dm^{-3} , as quais foram espaçadas de um período de 15 dias. Na
221 primeira aplicação de K (75 mg dm^{-3}) foi fornecida a dose completa de Ca
222 e de Mg juntamente com os micronutrientes e demais macronutrientes, na
223 mesma solução.

224

225 **Tabela 3.** Nutrientes, concentrações e fontes empregadas na adubação de
 226 plantas do experimento.

227 **Table 3.** Nutrients, concentrations and sources used in the fertilization of
 228 plants of the experiment.

Nutrientes	Concentração (mg dm ⁻³)	Fonte	Fórmula molecular
N	300	Ureia	(NH ₂) ₂ CO
P	400	Monoamônio fosfato	NH ₄ H ₂ PO ₄
K	300	Cloreto de potássio	KCl
Ca	75	Nitrato de cálcio	Ca(NO ₃) ₂
Mg	15	Nitrato de magnésio	Mg(NO ₃) ₂
S	30	Sulfato de magnésio	MgSO ₄
B	0,5	Ácido bórico	H ₃ BO ₃
Cu	1,5	Sulfato de cobre	CuSO ₄
Fe	5,0	FeEDTA	FeEDTA
Mo	0,1	Molibdato de amônio	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄
Mn	3,0	Sulfato de manganês	MnSO ₄
Zn	5,0	Sulfato de zinco	ZnSO ₄

229

230 O transplântio das mudas foi realizado aos 15 dias após a
 231 incubação dos solos, utilizando-se uma única planta na região central de
 232 cada vaso. Empregou-se mudas clonadas com 75 dias de idade e cerca de
 233 20 cm de altura. A reposição da água evapotranspirada foi realizada
 234 diariamente utilizando água desmineralizada, em quantidade suficiente
 235 para manter aproximadamente 60% da capacidade de campo. No final do
 236 período de cultivo das plantas foram avaliadas as variáveis de
 237 crescimento, fisiológicas e os teores de nutrientes no tecido vegetal.

238

239 Variáveis biométricas

240 As variáveis biométricas avaliadas inicialmente compreenderam a
241 altura de plantas (H) e o diâmetro do caule (DC), no final do período de
242 cultivo. As plantas foram cortadas, separadas em parte aérea e raízes,
243 sendo o material colhido seco em estufa de circulação forçada de ar a
244 65°C, até atingir peso constante. Foram quantificadas a produção de
245 matéria seca de parte aérea (MSPA), de raiz (MSR) e matéria seca total
246 (MST).

247

248 Variáveis nutricionais

249 Na matéria seca da parte aérea das plantas foram determinados os
250 teores de K, Ca e Mg no tecido vegetal, conforme procedimentos
251 analíticos descritos em EMBRAPA (2009). A partir das variáveis
252 avaliadas, foram calculados na matéria seca da parte aérea das plantas os
253 acúmulos de K (AK), Ca (ACa) e de Mg (AMg), conforme a equação:
254 acúmulo de nutriente (g planta⁻¹) = (MSPA * Teor do nutriente na
255 planta)/1000. Foram calculadas também as eficiências de uso de K
256 (EUK), de Ca (EUCa) e de (EUMg), de acordo com a equação: eficiência

257 de utilização = (matéria seca total (g) / teor do nutriente acumulado na
258 planta (mg) x matéria seca total (g)) (SIDDIQUI; GLASS, 1981).

259

260 **Variáveis fisiológicas**

261 As variáveis fisiológicas foram medidas no dia da colheita do
262 experimento, no período da manhã entre 9:00 e 11:00 horas, em folhas
263 totalmente expandidas da parte mediana da copa das plantas, sendo
264 avaliadas a taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração (E), efetuadas
265 com o auxílio do equipamento Infra-Red Gas Analyser – IRGA modelo
266 LI6400-XT.

267 Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste
268 F. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-
269 Knott, ao nível de 5% de probabilidade. Quando houve interações
270 significativas entre os tratamentos foi realizado desdobramento do
271 tratamento com e sem K, Ca e Mg dentro de cada solo. Todas as análises
272 foram realizadas com o auxílio do programa estatístico Sisvar 5.4
273 (FERREIRA, 2014). As variáveis também foram submetidas à análise de
274 componentes principais (PCA).

275

276 RESULTADOS E DISCUSSÃO

277 Conforme apresentado pela análise de variância (Tabela 4), foram
278 observados interações significativas entre os tratamentos, para as
279 variáveis: altura (H), diâmetro de caule (DC), teores foliares de potássio
280 (K foliar), de cálcio (Ca foliar), acúmulo de potássio (Acúmulo de K) e de
281 cálcio (Acúmulo de Ca), fotossíntese líquida (A) e concentração
282 intercelular de CO₂ (CI). Já para as demais variáveis os efeitos foram
283 individuais entre os tratamentos.

284

285 **Tabela 4.** Soma de quadrados da análise de variância para as variáveis
286 altura (H), diâmetro de caule (DC), matéria seca de parte aérea (MSPA),
287 de raiz (MSR) e total (MST), teores foliares de potássio (K), cálcio (Ca) e
288 magnésio (Mg), acúmulos de potássio (AK), cálcio (ACa) e magnésio
289 (AMg), eficiências de utilização de potássio (EUK), cálcio (EUCa) e
290 magnésio (EUMg), taxa fotossintética (A) e taxa de transpiração (E) em
291 mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição
292 de fontes minerais de K, Ca e Mg.

293 **Table 4.** Sum of squares of analysis of variance for the variables height
294 (H), stem diameter (DC), dry matter of aerial part (MSPA), of root (MSR)

295 and total (MST), foliar contents of potassium (K), calcium (Ca) and
 296 magnesium (Mg), accumulations of potassium (AK), calcium (ACa) and
 297 magnesium (AMg), use efficiencies of potassium (EUK), calcium
 298 (EUCa) and magnesium (EUMg), photosynthetic rate (A) and
 299 transpiration rate (E) in eucalyptus seedlings grown in seven soil classes,
 300 with and without the addition of mineral sources of K, Ca and Mg.

FV	GL	Soma de quadrados			
		H	DC	MSPA	MSR
Solos (S)	6	5.167,4**	47,1**	1.1109,0**	219,3**
Adubação (A)	1	2.866,1**	5,1**	2.467,5**	3,7 ^{ns}
S x A	6	1.446,8*	11,3*	401,3 ^{ns}	104,9 ^{ns}
Erro	56	5.051,7	37,5	3.836,8	617,5
CV		10,0	6,1	12,8	27,1

FV	GL	Soma de quadrados			
		MST	K	Ca	Mg
		14.360,9**	115,5**	356,7**	15,3**
Adubação (A)		2.559,1**	1.268,0**	59,7**	6,9**
S x A		660,4 ^{ns}	151,9**	54,7*	2,9 ^{ns}
Erro		3.531,7	169,5	204,2	18,2
CV		10,3	18,4	17,1	18,7

FV	GL	Soma de quadrados			
		AK	ACa	AMg	EUK
		1,8**	5,6**	0,4**	4,3**
Adubação (A)		9,6**	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	3,4**
S x A		0,7**	0,9**	0,0 ^{ns}	0,4 ^{ns}
Erro		1,4	1,8	0,2	1,8
CV		21,31	20,6	23,4	22,9

FV	GL	Soma de quadrados			
		EUCa	EUMg	A	E
		4,3**	37,2**	9,8 ^{ns}	57,3**
Adubação (A)		1,6**	26,5**	8,9*	6,4*
S x A		0,5**	8,1*	23,1*	14,8 ^{ns}
Erro		1,4	25,6	77,2	61,1
CV		25,78	30,8	9,9	11,9

302 **Variáveis biométricas**

303 Apenas as plantas cultivadas nos solos PVd, PAVd, PAd e RQo
 304 apresentaram H superior quando adubadas com K, Ca e Mg, enquanto
 305 plantas cultivadas nos PVd e PAd expressaram maior DC (Tabela 4).
 306 Certamente, estes resultados se devem existência de uma menor reserva
 307 de K, Ca e Mg, nestes solos (Tabela 2), corroborando aos resultados
 308 observados por Castro et al. (2010) e Amaral et al. (2015), em estudos
 309 envolvendo estes mesmos solos.

310

311 **Tabela 5.** Médias de altura de plantas (H) e diâmetro do caule (DC) em
 312 mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição
 313 de fontes minerais de K, Ca e Mg.

314 **Table 5.** Average of plant height (H) and stem diameter (DC) in
 315 eucalyptus seedlings grown in seven soil classes, with and without the
 316 addition of mineral sources of K, Ca and Mg.

Solos	Altura (H)		Diâmetro de caule (DC)	
	Com	Sem	Com	Sem
	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg
PVd	102,2 aA	86,2 cB	14,4 aA	12,4 cB
PVAd	98,4 aA	73,5 cB	14,0 aA	13,1 bA
PAd	95,4 aA	76,6 cB	13,7 aA	12,4 cB
CXve	102,0 aA	97,1 bA	13,8 aA	13,9 bA
RRd	107,0 aA	98,4 bA	13,8 aA	13,4 bA
MTo	107,2 aA	110,4 aA	14,6 aA	13,8 aA
RQo	95,8 aA	78,2 cB	11,6 bA	11,4 dA

317 Médias seguidas de letras minúsculas na coluna e maiúscula na linha não
318 diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5%
319 de probabilidade.

320

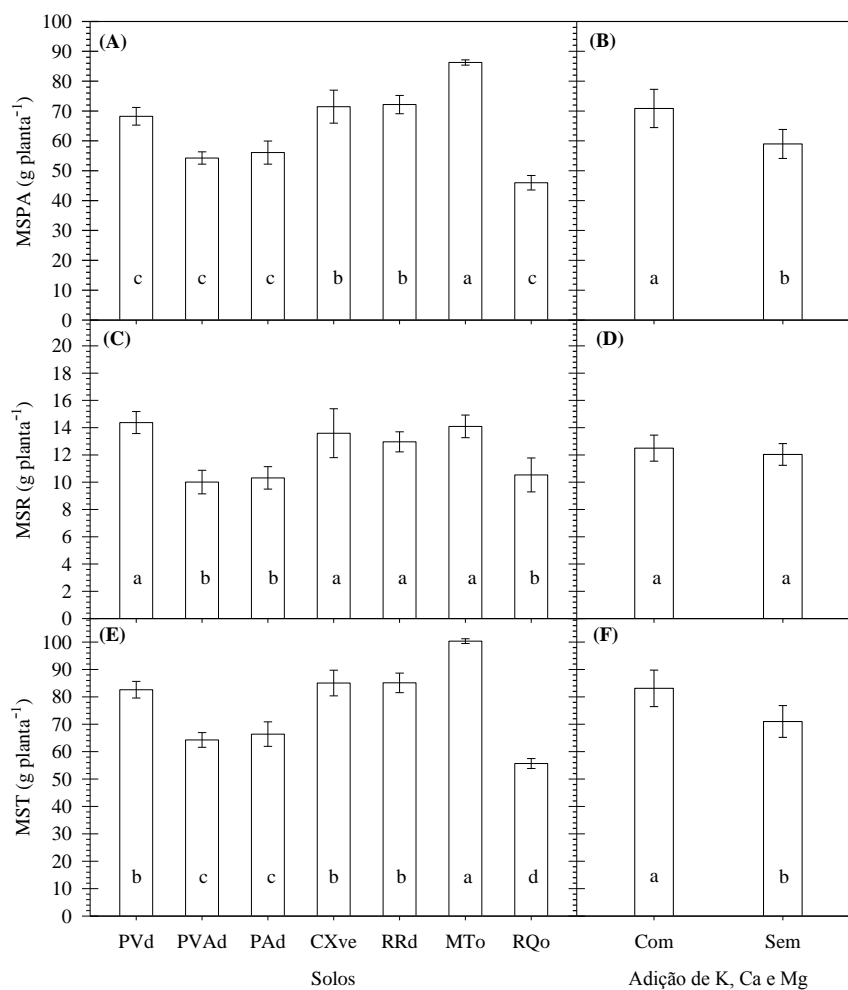
321 A ausência de respostas significativas para adubação com K, Ca e
322 Mg, expressada pela altura (H) de plantas (nos solos CXve, RRd e MTo)
323 e para diâmetro de caule (DC) de plantas (nos solos PVAd, CXve, RRd e
324 MTo) (Tabela 4), demonstra que os teores destes nutrientes nos referidos
325 solos, foi, no mínimo, suficiente para suprir as exigências das plantas em
326 nutrientes.

327 Nesse sentido, pode-se inferir que o suprimento de K, Ca e Mg via
328 adubação mineral, para as plantas cultivadas nos solos PVAd, CXve, RRd
329 e MTo, configurou a ocorrência do fenômeno denominado de consumo de
330 luxo (GOMMERS et al., 2005; MARSCHNER, 2012). Este fenômeno
331 caracteriza-se pela absorção de nutrientes em quantidades superiores as
332 demandadas pelo metabolismo, os quais são acumulados em organelas
333 das células vegetais (KAMINSKI et al., 2007), onde as plantas não
334 apresentam repostas em crescimento ou produção de biomassa.

335 O consumo de luxo de K, Ca e Mg pelas plantas pode ocasionar a
336 extração de quantidades apreciáveis destes nutrientes, das reservas

337 minerais e/ou adicionados pela adubação mineral (ALVES et al., 1988). O
338 que pode contribuir para exaustão de nutrientes no solo, aumentando os
339 custos de produção e comprometendo a obtenção de produções contínuas
340 em longo prazo.

341 Entre os solos, as variáveis MSPA e MST apresentaram o mesmo
342 comportamento, sendo as mesmas superiores nas plantas cultivadas no
343 solo MTo seguidas das plantas cultivadas nos solos CXve e RRd (Figura
344 2A e 2E). Já a MSR foi superior nas plantas cultivadas nos solos PVd,
345 CXve, RRd e MTo (Figura 2C). Em relação a adubação com K, Ca e Mg,
346 a MSPA e MST foram superiores em plantas cultivadas em solos que
347 receberam adubação com K, Ca e Mg (Figuras 2B e 2F).



348

349 **Figura 2.** Médias de matéria seca de parte aérea - MSPA (Figura 2A), de

350 matéria seca de raízes - MSR (Figura 2C) e de matéria seca total - MST (Figura

351 2E) de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição

352 de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figuras 2B, 2D e 2F). Médias seguidas de

353 letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao

354 nível de 5% de probabilidade.

355 **Figure 1.** Average of dry matter of aerial part - MSPA (Figure 2A), of
356 dry matter of roots - MSR (Figure 2C) and of total dry matter - MST
357 (Figure 2E) of eucalyptus seedlings grown in seven soil classes, with and
358 without addition of mineral sources of K, Ca and Mg (Figures 2B, 2D and
359 2F). Means followed by the same letters are not statistically different
360 from each other, by Scott-Knott test at 5% probability.

361

362 As variáveis H, DC (Tabela 5), MSPA, MSR e MST (Figura 2A,
363 2C e 2E) de plantas são comumente utilizadas como indicadores da
364 qualidade e do desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto (FREITAS
365 et al., 2010; FIGUEIREDO et al., 2011; RODRIGUES et al., 2012;
366 ROCHA et al., 2013; MELO et al., 2014). Os maiores valores destas
367 variáveis nas plantas cultivadas nos solos MTo, CXve e RRd, refletem o
368 efeito da mineralogia sobre a disponibilidade de K, Ca e Mg e
369 crescimento das plantas. Pois estes solos apresentam os minerais
370 feldspatos, micas e esmectitas (Figura 1), os quais constituem fontes de
371 K, Ca e Mg (KÄMPF; CURI, 2003; KÄMPF et al., 2009). Sendo estes
372 minerais predomnantes nos solos da região estudada (MELO et al.,
373 2004; BORTOLUZZI et al., 2005; FRAGA et al., 2009; CASTRO et al.,
374 2010).

375 **Variáveis nutricionais**

376 A superioridade dos teores foliares de K (Tabela 6), em plantas
377 cultivadas nos solos adubados com K, Ca e Mg, são uma consequência do
378 aumento da disponibilidade deste nutriente nos solos (Tabela 2).
379 Enquanto que a inferioridade dos teores foliares de Ca em plantas
380 cultivadas no solo MTo pode está associada com a inibição da absorção
381 de Ca, causada pela maior proporção de K na solução (Tabela 2)
382 decorrente da adubação.

383 **Tabela 6.** Teores de potássio (K), de cálcio (Ca), acúmulos de potássio
 384 (AK) e de cálcio (ACa) na matéria seca de parte aérea de mudas de
 385 eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes
 386 minerais de K, Ca e Mg.

387 **Table 6.** Contents of potassium (K) and calcium (Ca), accumulations of
 388 potassium (AK) and calcium (ACa) in the dry matter of the aerial part of
 389 eucalyptus seedlings grown in seven soil classes, with and without the
 390 addition of mineral sources K, Ca and Mg.

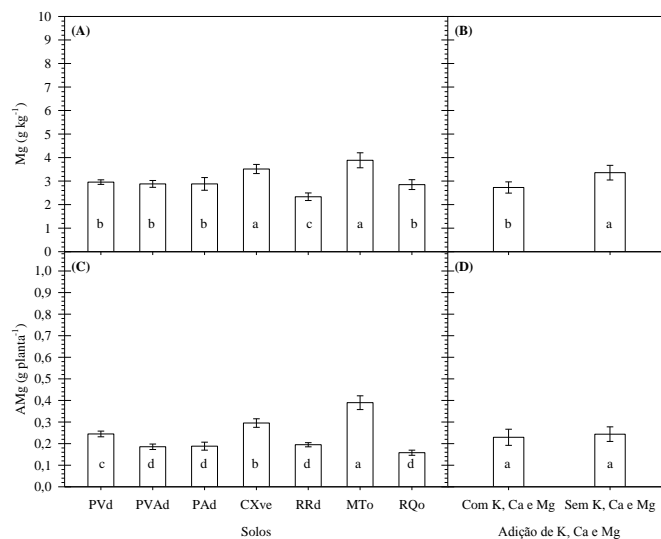
Solos	K foliar (g kg ⁻¹)		Ca foliar (g kg ⁻¹)	
	Com	Sem	Com	Sem
	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg
PVd	17,13 aA	5,82 aB	13,47 aA	14,76 aA
PVAd	13,84 bA	3,76 bB	12,08 aA	12,46 bA
PAd	12,07 cA	3,69 bB	8,87 cA	10,68 bA
CXve	10,07 cA	6,27 aB	10,50 bA	12,14 bA
RRd	14,11 bA	6,52 aB	6,43 dA	7,77 cA
MTo	11,66 cA	6,07 aB	10,57 bB	16,56 aA
RQo	17,23 aA	4,35 bB	9,71 cA	10,17 bA

Solos	AK (g planta ⁻¹)		ACa (g planta ⁻¹)	
	Com	Sem	Com	Sem
	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg
PVd	1,53 aA	0,44 aB	1,21 aA	1,11 bA
PVAd	0,98 cA	0,21 bB	0,86 bA	0,72 dA
PAd	0,92 cA	0,20 bB	0,69 cA	0,59 dA
CXve	0,90 cA	0,49 aB	0,94 bA	0,96 cA
RRd	1,38 bA	0,50 aB	0,60 cA	0,60 dA
MTo	1,17 cA	0,60 aB	1,06 aB	1,65 aA
RQo	1,03 cA	0,22 bB	0,58 cA	0,52 dA

391 Médias seguidas de letras minúsculas na coluna e maiúscula na linha não
 392 diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5%
 393 de probabilidade.

394 O maior acúmulo de K nas plantas cultivadas em todos os solos
395 que receberam adubação com K, Ca e Mg (Tabela 6), refletem a maior
396 produção de MST pelas plantas, conforme verificado na Figura 2E e 2F.
397 A inferioridade do acúmulo de Ca (ACa) nas plantas cultivadas apenas no
398 solo RQo adubado com K, Ca e Mg (Tabela 6), se devem aos menores
399 teores foliares deste nutrientes no tecido vegetal (Tabela 6) e a menor
400 produção de MST (Figura 2E).

401 Entre os solos, o maior teor de Mg foliar em plantas cultivadas nos
402 solos CXve e MTo (Figura 3A), pode ser justificado pela maior
403 disponibilidade e reserva deste nutriente (Tabela 2). Em relação a
404 adubação com K, Ca e Mg, a superioridade dos teores de Mg em plantas
405 cultivadas sem adubação (Figura 3B), pode está associada com a
406 interação entre estes nutrientes na solução do solo. Pois a elevada
407 disponibilidade de K e Ca nos solos, após a adubação (Tabela 2) pode ter
408 inibido a absorção de Mg pelas plantas e conseqüentemente reduziu os
409 teores deste nutriente em plantas cultivadas nos solos adubados.



410

411 **Figura 3.** Teor de magnésio - Mg (Figura 2A) e acúmulo de magnésio –
 412 AMg (Figura 2C) na matéria seca de parte aérea de mudas de eucalipto
 413 cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais
 414 de K, Ca e Mg (Figuras 2 B e 2D). Médias seguidas de letras não diferem
 415 estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de
 416 probabilidade.

417 **Figure 3.** Magnesium-Mg content (Figure 2A) and magnesium
 418 accumulation - AMg (Figure 2C) in the dry matter of aerial part of
 419 eucalyptus seedlings grown in seven soil classes, with and without the
 420 addition of mineral sources of K, Ca and Mg (Figures 2B and 2D). Means

421 followed by letters are not statistically different from each other, by Scott-
422 Knott test at 5% probability.

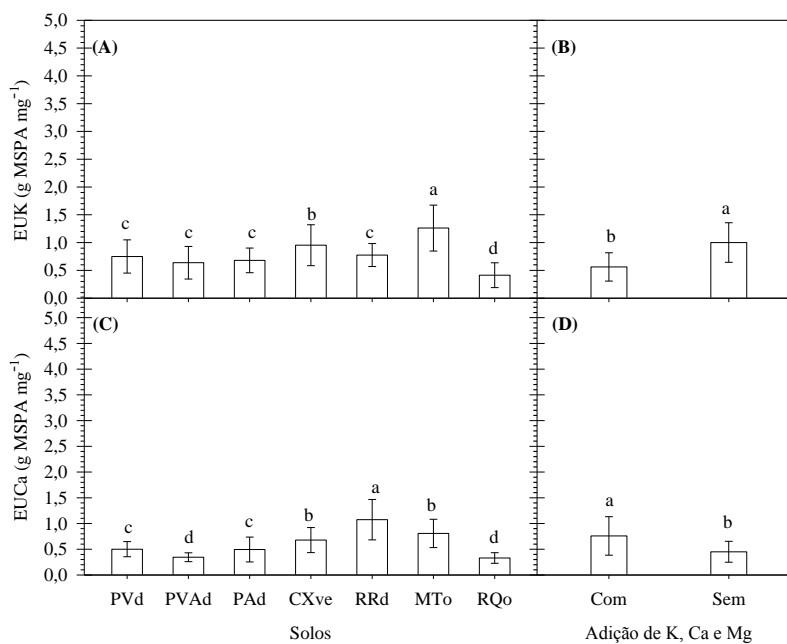
423 Na solução do solo, estes nutrientes apresentam diferentes
424 energias de fixação com os colóides em função do seu grau de hidratação
425 (SZIKSZAY, 1993), conforme a sequência $Ca > Mg > K$ (SCHOELLER,
426 1962) e para que não haja competição entre os sítios de absorção de K, Ca
427 e Mg das raízes, o ideal é que as saturações de K seja de 3 a 5%, de Ca
428 seja de 45 a 50% e de Mg seja de 12 a 15%, na capacidade de troca de
429 cátions dos solos (DEMATTÊ, 2011).

430 Os maiores acúmulos de Mg observados para as plantas cultivadas
431 no solo MTo, seguido do solo CXve (Figura 3A e 3C) são uma
432 consequência da produção de MST, a qual foi superior nas plantas
433 cultivadas nestes mesmos solos (Figura 2E). Pois o acúmulo de nutriente
434 no tecido vegetal tem uma relação direta com a produção de MST pela
435 planta, onde a maior produção de MST favorece ao maior acúmulo de
436 nutriente no tecido vegetal.

437 Entre os solos, os maiores valores de eficiências de uso de K
438 (EUK) nas plantas cultivadas no solo MTo (Figura 4A) e de Ca (EUCa)
439 nas plantas cultivadas no RRd (Figura 4C) se devem a maiores MST

440 (Figura 2E) e aos maiores teores destes nutrientes (Tabela 6) nas plantas
 441 cultivadas nos referidos solos.

442 Em relação a adubação (com ou sem K, Ca e Mg), a EUK foi
 443 inferior nas plantas cultivadas nas plantas cultivadas em solos não
 444 adubados com K, Ca e Mg (Figura 4B). Este resultado, certamente, se
 445 deve a maior disponibilidade de K nos solos adubados com K, Ca e Mg
 446 (Tabela 2). Alguns estudos (SILVA et al., 1996; SILVA et al., 2002)
 447 também observaram redução na eficiência de uso K por plantas de
 448 eucalipto, quando há aumento na disponibilidade deste nutriente no solo.



449

450 **Figura 4.** Eficiência de uso de potássio – EUK, (Figura 3 A), cálcio - EUCa
451 (Figura 3C) e eficiência de uso de magnésio - EUMg (Figura 3E) para produção
452 de matéria seca de parte aérea de mudas de eucalipto cultivadas em sete classes
453 de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg (Figuras 3B, 3D e
454 3F). Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo
455 teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

456 **Figure 4.** Efficiency of use of potassium - EUK (Figure 3A), of calcium -
457 EUCa (Figure 3C) and of magnesium - EUMg (Figure 3E) for dry matter
458 production of aerial part of eucalyptus seedlings cultivated in seven
459 classes of soils, with and without addition of mineral sources of K, Ca
460 and Mg (Figures 3B, 3D and 3F). Means followed by the same letters are
461 not statistically different from each other, by Scott-Knott test at 5%
462 probability.

463

464 A ausência de respostas significativas para EUMg em plantas
465 cultivadas nos solos PVd, PVAd e RQo, em relação a adubação com ou
466 sem K, Ca e Mg (Tabela 7), pode ser justificada em função da produção
467 de MST e do teor foliar deste nutriente. Pois as plantas cultivadas nestes
468 solos apresentaram menores valores de MST (Figura 2E) e de Mg foliar

469 (Figura 3A), as quais são variáveis envolvidas no cálculo da eficiência de
 470 uso de nutrientes pelas plantas (SIDDIQUI; GLASS, 1981).

471 **Tabela 7.** Médias de eficiência de uso de magnésio (EUMg) em mudas
 472 de eucalipto cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de
 473 fontes minerais de K, Ca e Mg.

474 **Table 7.** Averages of use efficiency of magnesium (EUMg) in
 475 eucalyptus seedlings grown in seven soil classes, with and without the
 476 addition of mineral sources of K, Ca and Mg.

Solos	EUMg	
	Com	Sem
	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg
PVd	2,7 cA	2,0 aA
PVAd	1,8 dA	1,4 bA
PAd	2,7 cA	0,9 bB
CXve	2,8 cA	1,7 aB
RRd	4,8 aA	2,1 aB
MTo	3,4 bA	2,3 aB
RQo	1,5 dA	0,8 bA

477 Médias seguidas de letras minúsculas na coluna e maiúscula na linha não
 478 diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5%
 479 de probabilidade.

480

481 A eficiência de uso de nutrientes pelas plantas depende da
 482 produção de MST e do teor do nutriente no tecido vegetal, conforme,
 483 também, observado por Pinto et al. (2011) e por Lima et al. (2005).
 484 Estudos sobre a eficiência de utilização de K, Ca e Mg podem auxiliar

485 silvicultores na adequação do manejo da adubação de plantios florestais,
 486 em função do potencial do solo em fornecer nutrientes para as plantas.

487 **Variáveis fisiológicas**

488 Os menores valores da taxa fotossintética (A) em plantas
 489 cultivadas no solo CXve, sem adubação com K, Ca e Mg (Tabela 8),
 490 podem está sendo influenciados pela disponibilidade nutrientes no solo,
 491 especialmente de K (CATUCHI et al., 2012), o qual está associado com a
 492 taxa fotossintética (MENDES et al., 2013).

493

494 **Tabela 8.** Taxa fotossintética (A) em mudas de eucalipto cultivadas em
 495 sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K, Ca e Mg.

496 **Table 8.** Photosynthetic rate (A) in eucalyptus seedlings grown in seven
 497 soil classes, with and without the addition of mineral sources of K, Ca
 498 and Mg.

Solos	A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	
	Com	Sem
	K, Ca e Mg	K, Ca e Mg
PVd	11,0 aA	12,4 aA
PVAd	10,5 aB	12,4 aA
PAd	11,0 aA	11,9 aA
CXve	12,3 aA	10,6 aB
RRd	11,5 aA	12,7 aA
MTo	12,6 aA	12,4 aA
RQo	11,2 aB	12,7 aA

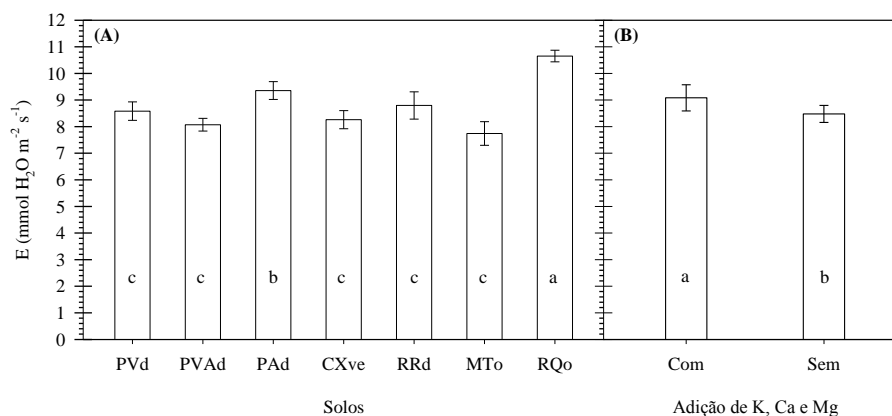
499 Médias seguidas de letras minúsculas na coluna e maiúscula na linha não
500 diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5%
501 de probabilidade.

502

503 Além disso, o desequilíbrio entre os teores de K, Ca e Mg na
504 solução do solo também pode exercer influencias sobre as variáveis
505 fisiológicas nas plantas. Pois os teores de Mg neste solo ocupa maior
506 percentual da capacidade de troca de cátions no solo, em relação ao K, e
507 Ca (Tabela 2), caracterizando o desequilíbrio. Contudo, a absorção de K
508 pelas plantas pode ser inibida quando há elevada disponibilidade de
509 cátions como o Ca e Mg na solução do solo (MARSCHNER, 2012), os
510 quais competem com o K pelos sítios celulares de absorção (FOLONI;
511 ROSOLEM, 2008).

512 A maior taxa transpiração E em plantas cultivadas no solo RQo,
513 seguidas das plantas cultivadas no solo PAd (Figura 5A), provavelmente
514 estão associados com a menor disponibilidade K nestes solos (Tabela 2),
515 corroborando aos resultados de Catuchi et al., 2012 e de Teixeira et a.
516 (2008). Plantas cultivadas em solos com menor disponibilidade de K,

517 tendem a apresentar maior taxa de transpiração, pois não possuem um
 518 controle rigoroso sobre abertura e fechamento de estômatos nas plantas.



519

520 **Figura 5.** Taxa de transpiração – E (Figura 4A) em mudas de eucalipto
 521 cultivadas em sete classes de solos, com e sem adição de fontes minerais de K,
 522 Ca e Mg (Figura 4B). Médias seguidas de letras não diferem estatisticamente
 523 entre si, pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

524 **Figure 5.** Transpiration rate - E (Figure 4A) in eucalyptus seedlings
 525 grown in seven soil classes, with and without the addition of mineral
 526 sources of K, Ca and Mg (Figure 4B). Means followed by letters are not
 527 statistically different from each other, by Scott-Knott test at 5%
 528 probability.

529

530 O K exerce funções essenciais em inúmeros processos
 531 metabólicos e fisiológicos nas plantas, atuando no controle osmótico das

532 células (MENDES et al., 2013). Este nutriente é responsável pela abertura
533 e fechamento dos estômatos, controlando o transporte de água, e
534 consequentemente a absorção de nutrientes (MARSCHNER, 2012).

535 Além disso, é necessário considerar a influência da textura sobre a
536 taxa de transpiração, pois o solo RQo apresentou o menor percentual de
537 argila, entre os solos estudados (Tabela 2). Solos de textura arenosa
538 apresentam maior disponibilidade de água no solo (FERNANDES et al.,
539 2015).

540 A análise de componentes principais (PCA) aplicado às variáveis
541 (Figura 6A) e aos tratamentos (Figura 6C), demonstrou que as
542 componentes PC1 e PC2 explicam 59,97% da variação total, em plantas
543 cultivadas com K, Ca e Mg. Enquanto que para as plantas cultivadas sem
544 adubação com K, Ca e Mg a PCA demonstrou que as componentes PC1 e
545 PC2 explicaram 73% da variação total (Figura 6B e 6D).

546 Nas plantas cultivadas em solos adubados com K, Ca e Mg
547 (Figura 6A), as maiores influências do solo CXve sobre as variáveis
548 MST, EUK, H, A, AK e DC de plantas, do solo MTo sobre o AMg, ACa,
549 Mg e Ca foliares e dos solos PAd e RQo sobre as variáveis E e K, refletem
550 a maior disponibilidade de K, Ca e Mg em formas absorvidas pelas

551 plantas, resultante da adição de fontes minerais destes nutrientes,
552 conforme verificado na Tabela 2.

553 Já nas plantas cultivadas em solos sem adição de K, Ca e Mg
554 (Figura 6B), as maiores influências dos solos RRd e CXVe sobre as
555 variáveis EUCa, K, Ca, EUMg, AK, H e MST, do solo MTo sobre DC,
556 EUK, AMg, ACa, Ca e Mg foliares e dos solos RQo e PAd sobre as
557 variáveis E e A, podem está associadas com mineralogia destes solos
558 (Figura 1).

559

572 Os solos RRd, CXve e MTo possuem minerais fontes de K, Ca e
573 Mg, o que pode ter contribuído para maior absorção e acúmulo destes
574 nutrientes, e conseqüentemente para o maior desenvolvimento das plantas
575 cultivadas nestes solos, mesmo sem adição de K, Ca e Mg. Já os solos
576 RQo e PAd, apresentam mineralogia pobre em K, Ca e Mg (Figura 1),
577 onde as plantas cultivadas sem adição de K, Ca e Mg devem apresentar
578 maior taxa de transpiração. Já que o nutriente K atua no controle de
579 abertura e fechamento de estômatos, e conseqüentemente das perdas de
580 água pelas plantas.

581

582 **CONCLUSÕES**

583 Plantas cultivadas em solos que possuem maiores reservas,
584 disponibilidade e cinética de liberação de K, Ca e Mg, apresentaram
585 altura (H), diâmetro de caule (DC) e matéria seca de parte aérea (MSR)
586 similares, com ou sem adubação com K, Ca e Mg.

587 As plantas apresentaram maior teor foliar e acúmulo de K em todos
588 os solos adubados com K, Ca e Mg. No entanto, a eficiência de uso deste
589 nutriente foi superior em plantas cultivadas em solos sem adubação.

590 A adubação com K, Ca e Mg promoveu redução na taxa
591 fotossintética (A) e taxa de transpiração de plantas cultivadas em solos
592 que possuem menores reservas e disponibilidade destes nutrientes.

593

594 **AGRADECIMENTOS**

595 Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento
596 Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do
597 Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de
598 Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio
599 financeiro.

600

601 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

602 FRAGA, T.I.; GENRO JUNIOR, S.A.; INDA, A.V.; ANGHINONI.
603 Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos
604 sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,
605 v.33, p.497-506, 2009.

606 BORTOLUZZI, E.C.; SANTOS, D.R.; KAMINSKI, J.; GATIBONI,
607 L.C.; TESSIER, D. Alterações na mineralogia de um Argissolo do rio
608 grande do sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de**
609 **Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.5, p.327-335, 2005.

- 610 MELO, G. W.; MEURER, E. J.; PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em
611 solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no rio grande do
612 sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v.28, n.4, p.597-603,
613 2004.
- 614 KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J.J. Óxidos de alumínio, silício,
615 manganês e titânio. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Ed.). Química e
616 mineralogia do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do
617 Solo, 2009. p. 573-610.
- 618 KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. In: CURI, N.
619 et al. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: UFV, 2003. v. 3, p.
620 1-54.
- 621 ALVES, A. C.; BRAUNER, J. L.; CORDEIRO, D. S.; ZONTA, E. P.;
622 CORREA, L. A. V. Exigências nutricionais em potássio, cálcio e
623 magnésio do sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**,
624 Brasília, v.23, n.5, p.529-536, 1988.
- 625 ALVES, M. J. F.; MELO, V. F.; REISSMA, N. N. C. B.; KASEKER, J.
626 F. Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda*
627 L. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.6, p.1599-1610,
628 2013.

- 629 AMARAL, F. H. C.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; INDA, A. V.;
- 630 ARAÚJO, E. F. Produtividade de *Eucalyptus grandis* e sua relação com a
- 631 cinética de liberação de macronutrientes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba,
- 632 v. 43, n. 108, p. 979-991, 2015.
- 633 AMARAL, J. F. T.; MARTINEZ, H. E, P.; LAVIOLA, B. G.;
- 634 FERNADES FILHO, E. I. & CRUZ, C. D. Eficiência de utilização de
- 635 nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41,
- 636 n.4, p.621-629, 2011.
- 637 ANDRADE, M. C. N.; MINHON, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED,
- 638 D.C.; SALES-CAMPOS, C. Estudo comparativo da constituição
- 639 nutricional da madeira e casca de espécies e clones de eucalipto visando o
- 640 cultivo de shiitake em toras. **Revista Árvore**, Viçosa, v.35, n.2, p.35:183-
- 641 192, 2011.
- 642 CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M.
- 643 V. Eficiência do uso de micronutrientes e sódio em três procedências de
- 644 acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28,
- 645 n. 1, p. 39-47, 2004.
- 646 CASTRO, P. P.; CURI, N.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V.;
- 647 GUILHERME, L. R. G.; MENEZES, M. D.; ARAÚJO, E. F.; FREITAS,

- 648 D. A. F.; MELLO, C. R.; SILVA, S. H. G. Química e mineralogia de
649 solos cultivados com eucalipto (*Eucalyptus spp.*). **Scientia Forestalis**,
650 Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 645-657, 2010.
- 651 CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.;
652 BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Physiological responses of soybean
653 cultivars to potassium fertilization under different water regimes.
654 **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.47, v.4, p.519-527, 2012.
- 655 DEMATTÊ, S. L. I. Ação do gesso e do calcário na relação
656 cálcio:magnésio do solo e na produtividade da cana-de-açúcar (The
657 impact of gypsum and lime on the Ca/Mg ratio of the soil and on the
658 productivity of sugarcane). **Informações Agronômicas**, Piracicaba,
659 n.136, p:11-16, 2011.
- 660 EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA
661 AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e
662 fertilizantes. 2.ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2009. 628 p.
- 663 EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA
664 AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed.
665 Brasília-DF, 2013. 353 p.

- 666 FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; CUNHA, V.L.P.; MARTINS, I.S.;
667 MARTINS, R. C.C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de
668 utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus spp.* no Vale do
669 Jequitinhonha, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.18, n.3, p.363-373,
670 2008.
- 671 FEPAGRO - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PESQUISA
672 AGROPECUÁRIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Atlas climático: Rio**
673 **Grande do Sul**. Porto Alegre, 2012.
- 674 FERNANDES, E. T.; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. Respostas
675 fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob
676 deficiência hídrica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.1, p.29-34, 2015.
- 677 FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in
678 multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.38, n.2,
679 p.109-112, 2014.
- 680 FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; CARNEIRO, J.G.A.; PENCHEL, R.M.;
681 BARROSO, D.G.; DAHER, R.F. Efeito das variações biométricas de
682 mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. **Revista**
683 **Árvore**, Viçosa, v.35, n.1, p.111, 2011.

- 684 FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de
685 potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no
686 sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa,
687 v.32, n.4, p.1549-1561, 2008.
- 688 FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G.; SOUZA, L. S.; CARNEIRO, J.
689 G. A.; PAULINO, G. M. Produção de mudas de eucalipto com substratos
690 para sistema de blocos. **Revista Árvore**, Viçosa v.34, n.5, 2010.
- 691 GOMMERS, A.; THIRY, Y.; DELVAUX, B. Rhizospheric mobilization
692 and plant uptake of radiocesium from weathered soils: I. Influence of
693 potassium depletion. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.
694 34, n. 6, p. 2167-2173, 2005.
- 695 KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER,
696 D. S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos
697 sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p.
698 1003-1010, 2007.
- 699 KÖPPEN, W.. **Grundriss der klimakunde**. Berlin: W. Guyter. 1931.
700 390 p.
- 701 LIMA, A. M. N.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R.; LEITE, F. P. Cinética
702 de absorção e eficiência nutricional de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} em plantas jovens

- 703 de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,
704 Viçosa, v. 29, n. 6, p. 903-909, 2005.
- 705 MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São
706 Paulo, Agronômica Ceres, 1980. p.170-202.
- 707 MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed London:
708 Elsevier, 2012. 643 p.
- 709 MELO, L. A.; PEREIRA, G. A.; MOREIRA, E. J. C.; DAVIDE, A. C.;
710 SILVA, E. V.; TEIXEIRA, L. A. F. Crescimento de mudas de *Eucalyptus*
711 *grandis* e *Eremanthus erythropappus* sob diferentes formulações de
712 substrato. **Floresta e Ambiente**, Seropédica v.21, n.2, p.234-242, 2014.
- 713 MENDES, H. S. J.; PAULA, N. F.; SCARPINATTI, E. A.; PAULA, R.
714 C. Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E.*
715 *urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **Cerne**, Lavras,
716 v.19, n.4, p.603-611, 2013.
- 717 PINTO, S. I. C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.;
718 MORETTI, B. S. EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE CLONES DE
719 EUCALIPTO NA FASE DE MUDAS CULTIVADOS EM SOLUÇÃO
720 NUTRITIVA. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2,
721 p.523-533, 2011.

- 722 ROCHA, J. H. T.; PIETRO, M. R.; BORELLI, K.; BACKES, C.; NEVES,
723 M. B. Produção e desenvolvimento de mudas de eucalipto em função de
724 doses de fósforo. **Cerne**, Lavras, v.19, n.4, p.535-543, 2013.
- 725 RODRIGUES, F. A. V.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; ALVAREZ,
726 V. H.; NOVAIS, R. F. Disponibilidade de zinco para mudas de eucalipto
727 em solos de Cerrado. **Revista brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.36
728 n.4, p.1249-1257, 2012.
- 729 SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.;
730 COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no
731 Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n. especial,
732 p. 2723-2733, 2008.
- 733 SCHOELLER, H. **Les eaux souterraines**. Paris, Mason. 1962, 642 p.
- 734 SIDDIQUI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified
735 approach to the estimation and comparison of nutrient utilization
736 efficiency in plants. **Journal Plant Nutrition**, Athens, v. 4, n. 3, p. 289-
737 302, 1981.
- 738 SILVA, I. R.; FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; CURI, N. Eficiência
739 nutricional para potássio em espécies florestais nativas. **Revista**
740 **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p.257-264, 1996.

- 741 SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; PEREIRA, P. R. G.
742 Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciado
743 pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,
744 Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1001-1010, 2002.
- 745 SPARKS, D. L. **Kinetics of soil chemical processes**. Davis: Academic;
746 1989.
- 747 SZIKSZAY, M. **Geoquímica das Águas**. São Paulo, Boletim IGUSP,
748 Série didática, n.5, IG-USP, 1993, 166 p.
- 749 TEIXEIRA, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.;
750 DEZORDI, C. Eucalyptus sp. seedling response to potassium fertilization
751 and soil water. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.18, n.1, p.47-63, 2008.
- 752 VETTORI, L. **Métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro: Equipe de
753 Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. (Boletim Técnico, 7).