

ANTONIO JOÃO DE LIMA NETO

**CONSTANTES  $I_{max}$ ,  $K_m$ ,  $C_{min}$ , COEFICIENTE DE PARTIÇÃO E ANÁLISES  
DE SOLO E FOLHA NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO PARA O  
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

L732c  
2018

Lima Neto, Antonio João de, 1985-

Constantes I<sub>max</sub>, K<sub>m</sub>, C<sub>min</sub>, coeficiente de partição e análises de solo e folha na recomendação de adubação para o eucalipto / Antonio João de Lima Neto. – Viçosa, MG, 2018. ix, 75 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 64-75.

1. Eucalipto. 2. Adsorção. 3. Solos - Análise. 4. Análise foliar. 5. Eucalipto - Nutrição. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

ANTONIO JOÃO DE LIMA NETO

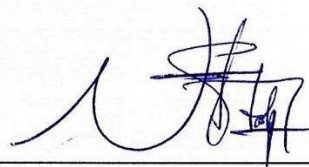
**CONSTANTES I<sub>max</sub>, K<sub>m</sub>, C<sub>min</sub>, COEFICIENTE DE PARTIÇÃO E ANÁLISES  
DE SOLO E FOLHA NA RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO PARA O  
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 14 de junho de 2018.



Mairam Félix de Barros



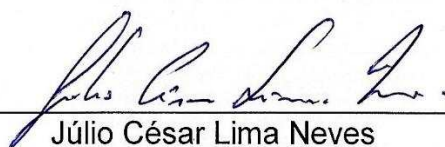
Nicolás Ignacio Stahringer



Lafayette Gonçalves Campelo Martins



Herminia Emilia Prieto Martinez  
(Coorientadora)



Júlio César Lima Neves  
(Orientador)

*Aos meus pais **Maria do Carmo Lima Sousa** e **José Felipe de Sousa**, pelo amor, incentivo, apoio, ensinamentos e pelos esforços para que eu pudesse trilhar esse caminho;*  
*Aos meus irmãos **Francisco de Sousa Lima** e **José de Sousa Lima Filho**;*  
*Aos meus sobrinhos **Sofia** e **Arthur**;*

*A toda minha família.*

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença constante em minha vida, sempre me acompanhando e me guiando na busca por meus sonhos.

Aos meus pais, pelos ensinamentos, por enfrentarem tantas dificuldades para que eu pudesse estudar, por me incentivarem e me apoiarem em todos os momentos.

Aos meus irmãos e a toda minha família por torcerem por mim.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Júlio César Lima Neves pela paciência, ensinamentos, sugestões e pela orientação.

Aos professores Nairam Félix de Barros, Lafayette Gonçalves Campelo Martins, Herminia Emilia Prieto Martinez e ao Doutor Nicolás Ignacio Stahringer pelas sugestões e contribuições para a melhoria deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

As secretárias Tatiani Gouvêa e Lídia Nunes, a Sebastião Geraldo da biblioteca setorial do DPS e a todos os demais funcionários da UFV.

Aos professores, pelos ensinamentos e conhecimentos repassados.

Ao professor Lourival Ferreira Cavalcante pela amizade, confiança, conselhos, ensinamentos e por sempre estar disposto a ajudar.

Ao professor William Natale e a Marisa Natale pela confiança, amizade, conselhos, pelos exemplos de humanidade, honestidade e simplicidade.

Aos amigos da República Paraíba, Antônio Gustavo e Stênio Andrey pela amizade e pelos bons momentos vividos.

Aos amigos de república Wilson Valbon, Guilherme de Moura, Adênio Junior e André Felipe pela convivência harmoniosa, brincadeiras e respeito.

Aos amigos Jailson Sousa, Roberto Lustosa, Vagner Filho, José Aridiano, Valéria Cavalcante, Wellington Souto, Ricardo Miranda, Francisco Charles, Járisson Nunes, Marcio Silveira, Edimar Rodrigues e aos demais amigos não citados aqui.

**Muito obrigado!!**

## **BIOGRAFIA**

ANTONIO JOÃO DE LIMA NETO, filho de José Felipe de Sousa e Maria do Carmo Lima Sousa, nasceu em Catolé do Rocha, Paraíba, no dia 18 de abril de 1985.

Em março de 2004 ingressou no curso de Licenciatura em Ciências Agrárias pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campus de Catolé do Rocha, concluindo-o em julho de 2007.

Em novembro 2007 iniciou o curso de graduação em Agronomia pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus de Areia, obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em dezembro de 2011.

Em março de 2012 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAV/UNESP), Campus de Jaboticabal, finalizando com a defesa da dissertação em fevereiro de 2014.

Em março de 2014 iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo-se a defesa de tese e obtendo o título de Doutor em Fitotecnia no dia 14 de junho de 2018.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Introdução do <i>Eucalyptus</i> no Brasil.....	4
2.2. Importância da adubação potássica para o eucalipto .....	5
2.3. Recomendação de adubação no Brasil.....	7
2.3.1. Uso de tabelas de recomendação de adubação .....	7
2.3.2. Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes (FertiCalc).....	8
2.4. Transporte e absorção de nutrientes.....	10
2.5. Fatores do solo que afetam o transporte e a absorção de íons .....	11
2.6. Cinética de absorção de nutrientes .....	12
2.7. Eficiência de absorção de nutrientes pelo eucalipto .....	12
2.8. Modelos para determinação da absorção de nutrientes.....	13
2.9. O método da linha de fronteira (LF) e suas aplicações .....	15
2.10. O método do diagrama de quadrantes do relacionamento planta-solo (DQRps) .....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
3.1. Determinação do Kd no solo e do influxo de K das plantas .....	18
3.2. Acúmulo de nutrientes pelo eucalipto.....	21
3.3. Obtenção de classes de fertilidade do solo para eucalipto .....	24
3.4. Obtenção de faixas de suficiência foliar para eucalipto.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1. Determinação do Kd no solo e do influxo de K das plantas .....	27
4.2. Correlação do Kd com atributos do solo .....	32
4.2. Acúmulo de nutrientes pelo eucalipto.....	40
4.3. Obtenção de classes de fertilidade do solo para eucalipto .....	49
4.4. Obtenção de faixas de suficiência foliar para eucalipto.....	59
5. CONCLUSÕES.....	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64

## RESUMO

LIMA NETO, Antonio João de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2018. **Constantes  $I_{max}$ ,  $K_m$ ,  $C_{min}$ , coeficiente de partição e análises de solo e folha na recomendação de adubação para o eucalipto.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientadora: Herminia Emilia Prieto Martinez.

A adoção de genótipos mais produtivos e mais exigentes nutricionalmente, aliado à baixa disponibilidade de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e elevada susceptibilidade à lixiviação dos solos sob plantios florestais, conduzem a exigência elevada em fertilizantes e justificam pesquisas que busquem racionalizar o uso desses insumos. Assim sendo, este trabalho teve como objetivos: a) determinar, com base no coeficiente de partição ( $K_d$ ) e nas constantes cinéticas de absorção de K do eucalipto, o teor de K no solo no qual a planta inicia a absorção e no qual o influxo máximo ( $I_{max}$ ) é atingido; b) obter curvas de relacionamento da produtividade com atributos químicos do solo e determinar classes de interpretação utilizando a linha de fronteira (LF); c) obter curvas de relacionamento entre o teor foliar de macronutrientes e os teores disponíveis no solo e estimar faixas de suficiência de macronutrientes para o eucalipto. Para obter o  $K_d$  foram utilizadas amostras de sete solos de localidades produtoras de eucalipto na região Centro-Leste de Minas Gerais. A partir de cada amostra foram obtidas 18 subamostras e nelas foram adicionadas soluções com seis doses de K (0, 10, 20, 40, 80 e 160 mg/L), na relação solo: solução de 1:10. As subamostras foram agitadas e no filtrado foram determinados os teores de K. Por diferença entre o aplicado e o teor no filtrado, foi calculado o K adsorvido no solo. Regressões lineares foram ajustadas entre o K adsorvido à fase sólida do solo (y) e o K em solução (x) e calculado o  $K_d$  de K para cada solo, considerando a declividade da função. Para obter o influxo de K das plantas, foram atribuídos valores de concentração junto às raízes, iniciando em 5,1  $\mu\text{mol/L}$  de K ( $C_{min}$  médio do eucalipto) até 250  $\mu\text{mol/L}$  para atingir o  $I_{max}$ . Essas concentrações foram multiplicadas pelo  $K_d$  de cada solo, obtendo-se o teor de K nos solos. Foi proposto um fator de sustentabilidade considerando o teor de K em cada solo, referente ao  $C_{min}$  e um fator que condiciona a máxima absorção pelas plantas de eucalipto (correspondente ao teor de K que proporcionou 98 % do  $I_{max}$ ). Esse fator de sustentabilidade é útil para aprimorar o módulo suprimento do sistema

FertiCalc-Eucalipto. Classes de fertilidade e faixas de suficiência foram obtidas usando um banco de dados de áreas cultivadas com eucalipto, contendo informações de produtividade, teores foliares e de atributos químicos do solo. Foram elaborados gráficos de dispersão relacionando o Incremento Médio Anual em volume de tronco (IMA relativo), com os teores de MO, P, K, Ca e Mg no solo. Nesses gráficos foram estabelecidas as LF e obtidas as equações para estimar as classes de fertilidade do solo. Teores foliares de N, P, K, Ca e Mg foram plotados com os teores de MO, P, K, Ca e Mg no solo. Usando o método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps), foi traçada uma linha horizontal e uma vertical separando a nuvem de pontos em quatro quadrantes. Com os pontos dos quadrantes III e I, foram ajustadas equações de regressão. Para obtenção das faixas de suficiência foliar, os valores dos níveis críticos e ótimos de MO, P, K, Ca e Mg do solo, obtidos pela LF, foram substituídos nas equações geradas pelo método do DQRps. Os teores de K no solo para as plantas iniciarem a absorção e atingirem 98 % do I<sub>max</sub> foram mais elevados nos solos mais argilosos. O modelo proposto utilizando as constantes cinéticas e o K<sub>d</sub> do K permitiu definir a faixa de teores no solo em que as plantas de eucalipto absorvem esse nutriente. As faixas adequadas de teores no solo determinadas pela LF, para obter uma produtividade de 47,7 m<sup>3</sup>/ha/ano, foram: 24,75-38,28 g/kg de MO; 9,7-14,35 mg/dm<sup>3</sup> de P; 100,0-150,35 mg/dm<sup>3</sup> de K; 0,77-1,47 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Ca; e 0,25-0,43 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Mg. As faixas de teores foliares determinadas pelo DQRps foram: 19,4-21,3 g/kg de N; 1,0-1,2 g/kg de P; 8,5-10,6 g/kg de K; 4,8-6,1 g/kg de Ca; e 1,9-2,4 g/kg de Mg.

## ABSTRACT

LIMA NETO, Antonio João de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2018. **Imax, Km, Cmin constants, partition coefficient and soil and leaf analyzes in the fertilizer recommendation for eucalyptus.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-adviser: Herminia Emilia Prieto Martinez.

The adoption of more productive and nutrient-demanding genotypes, in addition soils with low availability of organic matter (OM), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg), as well as low cation exchange capacity (CEC) and high leaching susceptibility of soils under forest plantations, lead high fertilizer demand and justify research that seeks to rationalize the use of these inputs. Therefore, the objectives of research were to: a) determine, based on the partition coefficient ( $K_d$ ) and eucalyptus kinetic constants of K absorption, the soil K content in which plants start absorption and in which the maximum influx ( $I_{max}$ ) is reached; b) obtain productivity relationship curves with soil chemical attributes and determine classes of interpretation using Boundary Line (BL); c) obtain relationship curves between macronutrient leaf contents and soil available contents in order to estimate macronutrient sufficiency ranges for eucalyptus. In order to obtain  $K_d$ , of seven soil samples from eucalyptus producing sites were collected in Eastern region of Minas Gerais state. Each sample was obtained 18 sub-samples and solutions with six K rates (0, 10, 20, 40, 80 and 160 mg/L) were added to there, in ratio soil: solution of 1:10. The sub-samples in solution containing these K rates were shaken and after wards filtered and K contents were determined in the filtered solutions. Was calculated by the difference between K applied initial and K contents in the filtered, soil adsorbed K. Regressions were adjusted between soil K adsorbed (y) and K in solution (x). Potassium  $K_d$  for each soil, is considered to be the functions slope. In order to obtain K influx by plants, concentration values were assigned to the solution near the roots, starting at  $5.1 \mu\text{mol/L}$  of K (mean value of  $C_{min}$  for eucalypt) up to  $250 \mu\text{mol/L}$  in order to reach maximum influx. These concentrations were multiplied by the  $K_d$  of each soil, and this allowed us to obtain soil K content. A sustainability factor was proposed considering soil K content of each soil that corresponds to  $C_{min}$  and a factor that conditions eucalyptus maximum influx (considering the K content that provided 98% of the  $I_{max}$ ). This sustainability factor is useful to improve the system supply module of FertiCalc-Eucalyptus. Fertility classes and

sufficiency ranges were obtained using a database of areas cultivated with eucalyptus, containing information on yield, leaf contents and soil chemical attributes. Scatter plots were drawn relating the mean annual increment in trunk volume (relative MAI) with soil OM, P, K, Ca and Mg. In those graphs and equations were to used estimate soil fertility classes. Leaf contents of N, P, K, Ca and Mg were plotted with soil contents of OM, P, K, Ca and Mg. Using the Quadrant Diagram of the Plant-Soil Relationship (QDpsR) method, a horizontal and vertical lines were drawn separating the cloud of points in four quadrants. With the points at the quadrants III and I, regression equations were fitted. In order to obtain foliar sufficiency ranges, soil values of critical and optimal levels of OM, P, K, Ca and Mg, obtained by BL, were substituted in the equations generated by the QDpsR method. Soil levels of K that allow plants to initiate nutrient absorption and reach 98% of the  $I_{max}$  to dye the  $I_{max}$  were higher in clayey soils. The proposed model, using kinetic constants and potassium  $K_d$ , allowed to define the range of soil contents in which the eucalyptus plants absorb this nutrient. The appropriate soil content ranges determined by BL for a productivity of 47.7 m<sup>3</sup>/ha/year were: 24.75-38.28 g/kg of OM, 9.7-14.35 mg/dm<sup>3</sup> of P, 100.0-150.35 mg/dm<sup>3</sup> of K, 0.77-1.47 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> of Ca, and 0.25-0.43 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> of Mg. Leaf content ranges determined by QDpsR are: 19.4-21.3 g/kg of N, 1.0-1.2 g/kg of P, 8.5-10.6 g/kg of K, 4.8-6.1 g/kg of Ca, and 1.9-2.4 g/kg of Mg.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de florestas plantadas do mundo. Nos últimos anos, houve aumento na área plantada com eucalipto, sendo encontrados grandes maciços florestais em todas as regiões. Em 2016 a área plantada com eucalipto foi de 5.673.783 ha, com maior concentração de povoamentos nos Estados de Minas Gerais (24,5 %), São Paulo (16,7 %) e Mato Grosso do Sul (15,5 %), que juntos respondem por mais da metade de toda a área cultivada no país (IBÁ, 2017).

A produtividade média das plantações de eucalipto em todo o Brasil aumentou em quatro vezes nas últimas décadas, passando de 10 m<sup>3</sup>/ha/ano em 1970 para 40 m<sup>3</sup>/ha/ano em 2015 (BINKLEY et al., 2017). Esse salto de produtividade foi alcançado graças aos avanços no melhoramento genético e ao aperfeiçoamento de práticas silviculturais, dentre elas, o manejo mais eficiente da nutrição e da fertilização dos plantios florestais.

A maioria dos plantios de eucalipto no Brasil estão estabelecidos em áreas de Cerrado cujos solos, apesar de possuírem características físicas favoráveis ao crescimento das plantas, são bastante intemperizados e lixiviados além de apresentarem baixa fertilidade natural e acidez elevada (GONÇALVES et al., 2008; GONÇALVES et al., 2013). Esses solos, em geral, apresentam baixos teores de potássio, cálcio e magnésio que são insuficientes para manter a capacidade produtiva da cultura ao longo do ciclo de cultivo (REATTO et al., 1998; FARIA et al., 2002; SANTANA et al., 2002).

Além da pobreza natural desses solos quanto à fertilidade, o cultivo do eucalipto em rotações sucessivas contribui ainda mais para o esgotamento dos estoques de nutrientes do solo, o que torna a fertilização uma prática indispensável para manter as elevadas produtividades obtidas (LEITE et al., 2010; MENEGALE et al., 2016). Esses fertilizantes devem ser aplicados na época adequada e em quantidades suficientes para suprir as exigências nutricionais das plantas, além de proporcionar altas produtividades com menor custo e menores impactos ambientais (SILVA et al., 2013).

O K é um dos nutrientes mais demandado pelo eucalipto e devido aos baixos teores de K trocável nos solos das áreas de plantio, é aplicado em doses elevadas através da fertilização (ALMEIDA et al., 2010; MELO et al., 2016).

Entretanto, parte do K aplicado pode ser lixiviado caso as doses não sejam parceladas adequadamente (SILVA et al., 2013).

Para parcelar a adubação potássica de forma mais precisa, é necessário conhecer as exigências nutricionais das plantas e o coeficiente de partição (Kd), que descreve a distribuição do K entre as fases sólida e a solução do solo. Solos que tem menor Kd apresentam capacidade limitada de reter os nutrientes aplicados via fertilização e por isso devem receber doses menores e mais frequentes de K que solos que possuem maior Kd.

A recomendação de adubação para as culturas é baseada na análise de solo, sendo o diagnóstico da fertilidade, feito com base em tabelas de recomendação (CANTARUTTI et al., 2007). Entretanto, mesmo quando a análise indica teores adequados de nutrientes no solo, não há garantia que as plantas serão supridas adequadamente, pois, fatores como umidade limitada, solos compactados, dentre outros, comprometem o transporte dos nutrientes no solo e sua absorção pelas plantas.

A análise foliar é uma prática comumente adotada na área florestal, complementar à análise química do solo, e tem como objetivo avaliar a condição nutricional das plantas e contribuir para a realização de ajustes na adubação. O uso da análise foliar baseia-se nas três premissas básicas propostas por Malavolta et al. (1997): a) deve existir, dentro de certos limites, uma relação direta entre o suprimento de nutrientes (pelo fertilizante) e a produção; b) entre a dose do fertilizante e o teor foliar; c) entre o teor foliar e a produção.

O plantio de novos materiais genéticos, mais produtivos e, provavelmente, mais exigentes em nutrientes, a introdução de novas técnicas silviculturais ou do cultivo em novos ambientes, tornam necessária a realização de novas pesquisas para determinar níveis críticos de nutrientes tanto no solo quanto nas folhas. Essas pesquisas servem como base para recomendações adequadas de fertilizantes, o que para o eucalipto é de grande relevância frente à carência de informações mais atuais (GAZOLA et al., 2015), visto que os níveis críticos no solo para a cultura foram determinados na década de 80 (NOVAIS et al., 1986).

Para estimar níveis críticos e faixas ótimas de nutrientes, seria necessário a instalação de experimentos de calibração, que no caso do eucalipto demandaria muito tempo e recursos (WADT et al., 1998). Uma alternativa para obtê-los sem a necessidade de instalação de experimentos de calibração, consiste em empregar o método da linha de fronteira (WEBB, 1972; BHAT et al.,

2012; BHAT; SUJATHA, 2013; ALI, 2018), associado ao método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento Planta-Solo (SOUSA et al., 2018), que apresentam como vantagem a possibilidade de utilizar dados de lavouras comerciais de alta produtividade.

Assim, este trabalho teve como objetivos: a) determinar os valores do coeficiente de partição ( $K_d$ ) de K em sete solos cultivados com eucalipto na região Centro-Leste de Minas Gerais e verificar a influência de atributos físicos e químicos do solo sobre o  $K_d$ ; b) determinar, com base no  $K_d$  e nas constantes cinéticas de absorção de K do eucalipto, o teor de K no solo no qual a planta inicia a absorção e no qual o influxo máximo ( $I_{max}$ ) é atingido; c) verificar a influência da absorção e acúmulo de K em grandes quantidades na parte aérea das plantas de eucalipto sobre a acumulação dos outros macronutrientes; d) estabelecer faixas de disponibilidade de atributos químicos do solo para o eucalipto, usando o método da linha de fronteira (LF); e) determinar faixas de suficiência para diagnose foliar de macronutrientes para o eucalipto, usando o método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução do *Eucalyptus* no Brasil

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália e foi introduzido no Brasil, inicialmente como planta ornamental, com o plantio de dois exemplares de *Eucalyptus globulus* no Jardim Botânico do Rio de Janeiro entre 1824 e 1829. No entanto, a introdução do eucalipto no Brasil para fins madeireiros ou comerciais se deu no início do século XX pelo silvicultor Edmundo Navarro de Andrade, junto à Companhia Paulista de Estradas de Ferro no Estado de São Paulo (VENTURIN et al., 2014).

Entre 1904 e 1909, Edmundo Navarro implantou no horto de Jundiá vários experimentos com eucalipto para obter matéria-prima destinada à produção de lenha para a Companhia Paulista de Estradas de Ferro no Estado de São Paulo. Diante dos resultados positivos das pesquisas, em 1909 a Companhia adquiriu a primeira gleba de terra em Rio Claro, iniciando ali os primeiros plantios de eucalipto em escala comercial (VENTURIN et al., 2014).

A partir de 1967, a silvicultura brasileira teve um grande impulso devido à política governamental de incentivos fiscais, que visava ao desenvolvimento da atividade florestal no país. No início, eram plantados aproximadamente 37.000 ha/ano com eucalipto e, ao final do período de incentivos fiscais, que perdurou até 1989, eram plantados 270.000 ha/ano (GONÇALVES et al., 2013).

O *Eucalyptus* encontrou no Brasil condições climáticas favoráveis ao seu crescimento, o que contribuiu para sua expansão para todas as regiões. Atualmente o país é líder mundial de produtividade florestal de eucalipto, com uma média de 35,7 m<sup>3</sup>/ha/ano, além de possuir a rotação mais curta do mundo, que equivale ao tempo decorrido entre o plantio e a colheita das árvores (IBÁ, 2017).

A produtividade dos primeiros plantios de eucalipto no Brasil era relativamente baixa, variando de 10 a 30 m<sup>3</sup>/ha/ano. Entretanto, por meio da adaptação de genótipos às diversas condições de clima e solo das várias regiões do país, nas melhorias nas práticas de manejo silviculturais, do uso de corretivos e fertilizantes, dentre outros fatores, as produtividades se elevaram atingindo de 25 a 60 m<sup>3</sup>/ha/ano (GONÇALVES et al., 2013).

As principais espécies cultivadas atualmente no Brasil são o *Eucalyptus grandis*, *E. citriodora*, *E. camaldulensis*, *E. saligna* e *E. urophylla*. Além disso foram realizados cruzamentos entre as espécies, obtendo-se vários híbridos como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*).

## 2.2. Importância da adubação potássica para o eucalipto

O K é o segundo nutriente que mais limita a obtenção de altas produtividades pelas florestas de eucalipto no Brasil e o segundo ou terceiro nutriente mais acumulado pelas plantas, ficando às vezes atrás do N e do Ca. A quantidade de K absorvida pode variar de 160 a 230 kg/ha para produtividades estimadas variando de 30 a 50 m<sup>3</sup>/ha/ano (BARROS et al., 2014).

Os solos cultivados com eucalipto, na sua grande maioria, são altamente intemperizados e apresentam baixos teores de K, fato que pode se agravar ainda mais com as rotações sucessivas, que contribuem para o esgotamento dos teores do nutriente no solo (LEITE et al., 2010). Em áreas produtoras de eucalipto na Região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais, Reatto et al. (1998) constataram que os solos apresentam baixa capacidade de troca catiônica, baixa saturação por bases (1 a 2 %), alta percentagem de saturação por alumínio (68 a 94 %), e que os teores de K trocável são insuficientes para manter satisfatória produtividade dos plantios de eucalipto.

Em áreas produtoras de eucalipto em cinco municípios do Estado de São Paulo (Angatuba, Itapetininga, Paraibuna, São José dos Campos e São Miguel Arcanjo), foi constatado que os teores de K no solo, em geral, são insuficientes para mais de uma rotação e, juntamente com o Ca, é o nutriente que mais limita a próxima rotação (SANTANA et al., 2002).

A adubação potássica é indispensável para as florestas de eucalipto e tem proporcionado aumentos significativos de produtividade. Em *Eucalyptus grandis*, cultivado em solo arenoso com baixos teores de K trocável (0,02 cmol/kg), a adubação com 116 kg/ha de K proporcionou ganhos de 139 % na produtividade da biomassa de tronco aos 36 meses, em comparação às plantas não adubadas com K (ALMEIDA et al., 2010).

Avaliando a adubação com K em plantios clonais de eucalipto, sendo dois híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* e um híbrido de *E. urophylla* x *E. globulus* em solos com baixos teores de K trocável (0,03 a 0,04 cmol/kg), de quatro

localidades (Luís Antônio-SP, Mogi-Guaçu-SP, Paulistânia-SP e Ribas do Rio Pardo-MS), Melo et al. (2016) constataram que o K promoveu aumentos de produtividade. A maior resposta foi obtida no plantio de Ribas do Rio Pardo com ganhos superiores a 130 % aos 60 meses, na dose de 125 kg/ha de K.

Em trabalho realizado em Três Lagoas no Mato Grosso do Sul, em um Neossolo com baixos teores de K ( $0,02 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ ), plantas de *Eucalyptus urophylla* obtiveram a máxima produtividade de madeira com a aplicação de 125 kg/ha de  $\text{K}_2\text{O}$  aos 21 meses (GAZOLA et al., 2015). Em plantio de *Eucalyptus grandis* conduzido no município de Itamarandiba, Minas Gerais, foi constatado que o efeito residual da aplicação de 240 kg/ha de  $\text{K}_2\text{O}$  no plantio, aumentou em 54 % a produção de madeira na segunda rotação (FARIA et al., 2002).

A adubação potássica tem proporcionado ganhos de produtividade cada vez mais expressivos em plantios de eucalipto, devido à sua expansão para regiões onde os solos apresentam baixos teores de K e períodos pronunciados de estresse hídrico (ALMEIDA et al., 2010; SILVA et al., 2013; MELO et al., 2016). Esse nutriente exerce papel importante no controle osmótico das células, uma vez que a sua deficiência em plantas causa abertura e fechamento dos estômatos de forma irregular e a diminuição no turgor e expansão celular (MALAVOLTA et al., 1997).

A influência do K sobre as características fisiológicas de plantas de eucalipto, cultivadas sob déficit hídrico, foram evidenciadas em alguns trabalhos. Em genótipos de *E. grandis* x *E. urophylla*, a adubação potássica proporcionou maior controle estomático, maior taxa fotossintética e maior eficiência do uso de água nas plantas sob deficiência hídrica, quando comparadas as não adubadas com K (MENDES et al., 2013).

Maior ajuste estomático em plantas de eucalipto sob déficit hídrico e adubadas com K foi constatado também por Battie-Laclau et al. (2014) em plantações comerciais de clones de *Eucalyptus grandis* no Estado de São Paulo. Esses autores observaram que a adubação potássica aumentou em 2,5 vezes a condutância estomática e a taxa líquida de assimilação de  $\text{CO}_2$  sob condições de déficit hídrico e proporcionou um aumento de 60 % na eficiência do uso de água para produção de tronco.

## **2.3.Recomendação de adubação no Brasil**

No Brasil, os primeiros trabalhos de correlação e calibração de métodos de análises de solo, como base para a recomendação de corretivos e fertilizantes foram desenvolvidos a partir do início da década de 60. O trabalho desenvolvido pelo Professor Robert Cate em 1965, apesar de modesto, serviu como base para despertar o interesse sobre o assunto em diversos Estados e Regiões brasileiras (LOPES; GUILHERME, 2007).

A partir da contribuição do Prof. Robert Cate, os trabalhos de correlação e calibração se intensificaram e Boletins de Recomendação de Corretivos e Fertilizantes foram publicados atendendo às diversas culturas. Ao longo dos anos, com o desenvolvimento de novas pesquisas, esses boletins vêm sendo atualizados e contemplam alguns estados como Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999) e São Paulo (RAIJ et al., 1997).

### **2.3.1. Uso de tabelas de recomendação de adubação**

As tabelas de recomendação são ainda largamente utilizadas no Brasil por pesquisadores, produtores e profissionais da área agrícola. Elas são de fácil utilização e contribuíram para padronizar a interpretação dos resultados das análises químicas do solo e a recomendação de corretivos e fertilizantes para diversas culturas. A partir delas, as recomendações são mais uniformes entre todos os técnicos, embora possam conter inconsistências e inexatidão (CANTARUTTI et al., 2007).

Apesar da grande contribuição proporcionada pelo uso das tabelas, alguns aspectos devem ser questionados quanto às suas limitações. Os manuais de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999) e São Paulo (RAIJ et al., 1997) foram atualizados a quase duas décadas, e nesse período novas áreas de cultivo vêm sendo utilizadas, os cultivares são mais produtivos e mais exigentes nutricionalmente e as práticas culturais também mudaram.

Para a cultura do eucalipto, por exemplo, as doses de K recomendadas pelo manual de São Paulo variam de 0 a 80 kg/ha de K<sub>2</sub>O (RAIJ et al., 1997). Entretanto, trabalhos realizados em empresas produtoras de eucalipto no Estado promovem aumentos de produtividade com doses de até 150 kg/ha de K<sub>2</sub>O (MELO et al., 2016). Para a mesma cultura, os níveis críticos de manutenção no

boletim de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999), contemplam produtividades de até 50 m<sup>3</sup>/ha/ano. Porém, atualmente existem empresas atingindo produtividades bem mais elevadas.

A necessidade de reduzir os custos dos experimentos de adubação, realizados em diferentes locais, induz a utilização de pequenas parcelas em comparação a área cultivada com a espécie. Além disso, a aplicação de fertilizantes e a realização de outros tratos culturais sob as condições experimentais, podem diferir daquelas adotadas em condições de campo o que torna arriscada a extrapolação dos resultados (TOMÉ JUNIOR, 2004).

As tabelas de recomendação de corretivos e fertilizantes, embora tenham sido elaboradas com a mesma fundamentação, não apresentam equivalência das doses recomendadas para as culturas com a mesma faixa de produtividade (CANTARUTTI et al., 2007). Para condições semelhantes de solo e cultivo, há uma grande variabilidade nas recomendações feitas pelas tabelas de diferentes Estados brasileiros (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A forma como as tabelas de recomendação são elaboradas não permitem a fácil incorporação, de forma imediata pelo usuário, de novos conhecimentos científicos e nem que as mesmas sejam adaptadas a condições regionalizadas, ou seja, pode ser considerada uma estrutura aberta à evolução, mas exige a participação de especialistas (TOMÉ JUNIOR, 2004).

O desenvolvimento de uma agricultura de precisão, cada vez mais avançada e tecnicizada, exige também um manejo mais rigoroso dos fatores que estão diretamente relacionados com a produtividade, dentre eles a fertilização. Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos de recomendação de fertilizantes que preconizam o manejo específico para cada sítio, levando em consideração a variabilidade existente entre eles, é o que vem se buscando atualmente.

### **2.3.2. Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes (FertiCalc)**

O sistema FertiCalc vem sendo desenvolvido pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa para várias culturas e teve como base o sistema proposto por Barros et al. (1995) para a cultura do eucalipto e de modo mais genérico foi abordado por Novais e Smyth (1999) para o cálculo da demanda e do suprimento de P. De acordo com esses autores, é necessário o

desenvolvimento de sistemas para recomendação de adubação em bases científicas (modelos), em substituição as tabelas de recomendação de adubação, que estimem doses recomendadas de nutrientes levando em consideração fatores ligados à planta, como a produtividade esperada, bem como, características ligadas ao solo.

O sistema FertiCalc é subdividido em dois subsistemas: o subsistema requerimento (REQ), que contempla a demanda de nutrientes pela planta, considerando a eficiência de recuperação dos nutrientes aplicados e uma dose para atender o critério de “sustentabilidade”; e o subsistema suprimento (SUP), que compreende a oferta de nutrientes pelo solo, pela calagem, pela matéria orgânica, pelos resíduos orgânicos deixados da cultura anterior, e pela água de irrigação (DEUS et al., 2015).

A lógica envolvida nesse sistema de recomendação de adubação é conceitualmente simples: as doses de fertilizantes recomendadas pelo FertiCalc, são calculadas com base na diferença entre as exigências nutricionais da cultura e a quantidade de nutrientes fornecida naturalmente pelo solo, considerando que devem continuar a existir teores mínimos dos nutrientes no solo, evitando o esgotamento de sua capacidade de sustentação de futuros cultivos (TOMÉ JUNIOR, 2004).

Apesar de ser considerado satisfatório na recomendação de corretivos e fertilizantes para as culturas para as quais foi desenvolvido, o sistema FertiCalc precisa ser aprimorado, inclusive quanto ao subsistema suprimento pelo solo, levando em consideração a sustentabilidade. No sistema FertiCalc o componente de sustentabilidade corresponde a uma dose de nutrientes que serve como uma reserva, visando evitar o esgotamento de nutrientes no solo ao longo do tempo e para garantir um rendimento mínimo em culturas subsequentes (CANTARUTTI et al., 2007).

Devido à grande variabilidade dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos, bem como das características genéticas das plantas, não consideradas atualmente no componente sustentabilidade, sugere-se que o mesmo seja determinado levando em consideração a variação entre os tipos de solo e a concentração mínima do nutriente no solo a partir da qual as plantas iniciam à absorção ( $C_{min}$ ).

O sistema FertiCalc, apesar de indicar doses mais adequadas de corretivos e fertilizantes em função da produtividade esperada, não sugere ao

produtor uma forma de parcelamento da adubação ao longo do ciclo da cultura. Isso indica a necessidade de ajustes no sistema para maximizar o aproveitamento pelas culturas, dos fertilizantes aplicados.

#### **2.4. Transporte e absorção de nutrientes**

As plantas para crescerem e produzirem satisfatoriamente necessitam de nutrientes em quantidades adequadas para suprir suas exigências. Esses nutrientes encontram-se em pequenas concentrações no solo, exigindo que as plantas desenvolvam estratégias para facilitar a absorção, como o aumento da superfície radicular, permitindo explorar maior volume da solução do solo (FERNANDES; SOUZA, 2006).

A absorção de íons pelas plantas é o processo pelo qual ocorre a passagem de um determinado nutriente do substrato (solo, solução nutritiva) para uma parte qualquer da célula vegetal (parede, citoplasma, vacúolo). Para que esse nutriente seja absorvido, é necessário, em primeiro lugar, que ele entre em contato com as raízes das plantas, seja por interceptação radicular, por difusão ou por fluxo de massa (MALAVOLTA et al., 1997).

Os conceitos de transporte de nutrientes da solução do solo até à superfície das raízes das plantas, geralmente consideram apenas os mecanismos de fluxo de massa e difusão, e incluem a interceptação radicular no componente de difusão. Na interceptação radicular, os nutrientes são interceptados pelas raízes durante o seu processo de crescimento, sendo este mecanismo responsável por suprir pequena porcentagem da quantidade requerida pelas plantas (MARSCHNER, 2012). Entretanto, esse mecanismo não tem sido considerado no transporte de nutrientes, pois não é aceita a possibilidade de trocas diretas entre os nutrientes adsorvidos aos colóides do solo e as raízes das plantas, havendo necessidade do meio líquido para que a absorção ocorra (RUIZ et al., 1999). Contudo, a medida que as raízes crescem há interceptação do nutriente que está presente na fase líquida.

O fluxo de massa consiste no movimento contínuo do nutriente na solução do solo, de uma região mais úmida, distante da raiz até outra mais seca, próxima da superfície radicular. Já no processo de difusão, ocorre o movimento do elemento a curtas distâncias dentro da fase aquosa, a solução do solo, a favor de um gradiente de concentração, isto é, de uma região de maior concentração

para uma de menor concentração, a superfície da raiz em que a absorção fez com que a concentração de nutrientes diminuísse (MALAVOLTA et al., 1997).

O suprimento de nutrientes até a superfície das raízes se processa principalmente por fluxo de massa e difusão. O fluxo de massa é o mecanismo mais importante de suprimento de N, Ca, Mg, S e micronutrientes, e a difusão é o principal processo de contato do P e K do solo com às raízes, suprindo esses nutrientes quase na sua totalidade às plantas (MALAVOLTA et al., 1997).

Ao avaliarem a contribuição dos mecanismos de transporte de nutrientes até à superfície das raízes de plantas de arroz, Ruiz et al. (1999) concluíram que a difusão foi o mecanismo mais importante para o suprimento de K, apesar do fluxo de massa ter contribuição significativa no processo quando a concentração de K na solução do solo era elevada. Já Ca e Mg foram transportados por fluxo de massa em quantidades acima das exigidas pelas plantas.

## **2.5. Fatores do solo que afetam o transporte e a absorção de íons**

Para que os nutrientes, aplicados via fertilização ou disponibilizados pela fase sólida do solo, sejam absorvidos pelas plantas, é necessário que ocorra o estabelecimento do contato do íon com as raízes. Entretanto, a mobilidade de íons na solução do solo é afetada por diversos fatores físicos e químicos que influenciam a disponibilidade e a absorção de nutrientes para as plantas.

Em trabalho realizado em três Latossolos no Rio Grande do Sul, Gianello e Mielniczuk (1981) concluíram que a concentração de K na solução do solo foi o fator que mais afetou a absorção do nutriente por plantas de milho, seguido do teor de água, do poder tampão e do teor de argila. Esses autores afirmam que quando o K está em baixa concentração no solo, seu movimento até as raízes pode ser compensado, até certo ponto, pelo maior teor de água no solo ou vice-versa.

Ao utilizarem o modelo de Barber-Cushman para estimar a absorção de K por plantas de sorgo, Meurer e Anghinoni (1994) identificaram, através de testes de sensibilidade que os parâmetros do solo que mais afetaram a absorção do nutriente foram o teor de água do solo e a concentração inicial de K em solução.

## 2.6. Cinética de absorção de nutrientes

A quantidade de nutrientes absorvida pelas plantas é influenciada por diversos atributos do solo, que determinam o movimento de íons na solução e a chegada até às raízes, e por características morfológicas e fisiológicas da própria planta. Dentre as características morfológicas, o comprimento e o diâmetro das raízes influenciam a superfície de absorção e, conseqüentemente, a eficiência de absorção dos nutrientes pelas plantas (VILELA; ANGHINONI, 1984).

Além da morfologia das raízes, a capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas é influenciada também pelos parâmetros cinéticos de absorção ( $I_{max}$ ,  $K_m$ ,  $C_{min}$ ). De acordo com Cometti et al. (2006) a absorção de íons pelas plantas, em soluções com baixas concentrações, segue geralmente a cinética de Michaelis-Menten, cujo modelo matemático é representado pela equação:  $I = I_{max} C / (K_m + C)$ , no qual,  $I$  corresponde ao influxo ou velocidade de absorção do íon ( $\mu\text{mol/g/h}$ ) numa solução de concentração  $C$  ( $\mu\text{mol/L}$ ).

As constantes  $I_{max}^1$  ( $\mu\text{mol/g/h}$ ) e  $K_m$  ( $\mu\text{mol/L}$ ) representam a velocidade máxima de absorção e a concentração em que a velocidade máxima de absorção corresponde à metade do  $I_{max}$ , respectivamente. Assim, quanto maior o valor de  $I_{max}$ , maior será a velocidade de absorção do nutriente do solo pela planta e, quanto menor o  $K_m$ , maior a afinidade do transportador pelo nutriente do solo (COMETTI et al., 2006).

Posteriormente a equação de Michaelis-Menten foi modificada por Claassen e Barber (1974) para incluir o parâmetro  $C_{min}$ , que se refere a concentração do nutriente na solução do solo junto às raízes onde o influxo para de ocorrer (MARSCHNER, 2012).

## 2.7. Eficiência de absorção de nutrientes pelo eucalipto

A eficiência de absorção de nutrientes pelo eucalipto é variável entre espécies (VALE et al., 1984a; FURTINI NETO et al., 1996; STAHL et al., 2013) e entre clones (GRESPLAN et al., 1998; LIMA et al., 2005; PINTO et al., 2011). De acordo com Anghinoni et al. (1989), diferenças entre espécies e genótipos na absorção de nutrientes estão relacionadas a características morfológicas de raízes (volume, comprimento, raio médio, superfície e taxa de crescimento) e

---

<sup>1</sup> Na literatura pode-se encontrar  $V_{max}$  ou  $I_{max}$  representando a mesma constante. Dessa forma, optou-se por padronizar o termo para  $I_{max}$ , que é com mais frequência utilizado para absorção de nutrientes.

aos parâmetros cinéticos de absorção, que compreendem o influxo máximo ( $I_{max}$ ), a afinidade dos carregadores pelo íon a ser transportado ( $K_m$ ) e a concentração do nutriente na solução do solo junto as raízes onde o influxo para de ocorrer ( $C_{min}$ ).

Os parâmetros cinéticos de absorção iônica ( $I_{max}$ ,  $K_m$ ,  $C_{min}$ ) para a cultura do eucalipto, foram determinados para N (VALE et al., 1984a; GRESPAN et al., 1998), P (VALE et al., 1984b; FURTINI NETO, 1994), K, Ca e Mg (LIMA et al., 2005). Essas constantes foram determinadas em trabalhos avaliando a absorção de cada nutriente de forma isolada. Porém, Pinto (2009) determinou essas constantes, de forma conjunta para P, K, Ca e Mg em clones de eucalipto, visando verificar possíveis interações entre nutrientes.

As constantes cinéticas podem ser afetadas significativamente por fatores ambientais e inerentes à própria planta como a espécie, a idade da planta, a idade da raiz, o nutriente em estudo, a presença de outros elementos em solução que podem causar interações ou antagonismo entre íons, o teor de oxigênio na rizosfera, temperatura, entre outros (MEURER, 2006).

As diferenças nos parâmetros cinéticos, verificados em função dos fatores apresentados acima, refletem em diferenças na capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas. Nesse sentido, uma planta ideal deve apresentar alto  $I_{max}$  e baixos valores para  $K_m$  e  $C_{min}$  (HORN et al., 2006). Em termos práticos, espera-se que materiais genéticos com maior  $I_{max}$  e menor  $K_m$  sejam superiores em termos de absorção, independente do nutriente encontrar-se em alta ou em baixa disponibilidade no solo (LIMA et al., 2005).

## **2.8. Modelos para determinação da absorção de nutrientes**

A absorção de nutrientes pelas plantas é o resultado das interações entre a planta e o solo. Ela pode ser estimada por meio de modelos mecanísticos, que integram fatores relacionados ao solo e fatores intrínsecos da planta. Dentre as informações de solo requeridas por esses modelos, devem ser considerados os processos de transporte (difusão e fluxo de massa) de nutrientes na solução do solo até as raízes, a concentração do elemento na solução do solo, o poder tampão do nutriente (MALAVOLTA et al., 1997; MEURER, 2006) e o coeficiente de partição ( $K_d$ ).

O  $K_d$  é um parâmetro derivado da isoterma de adsorção, definido como a razão entre a concentração do elemento na fase sólida e a da solução de equilíbrio. Esse parâmetro representa o resultado de vários processos pelos quais os íons podem ser transferidos entre o solo e a solução e são satisfatórios para comparar o comportamento de diferentes solos com respeito a um dado cátion em determinadas condições. Valores elevados de  $K_d$  indicam elevada retenção de elementos pela fase sólida, já um valor de  $K_d$  baixo indica que grande parte do elemento permanece em solução (SHAHEEN et al., 2013)

Os parâmetros da planta necessários para alimentar adequadamente modelos mecanísticos que simulam a absorção de nutrientes pelas plantas, incluem os que descrevem variações na geometria das raízes e seu tamanho (velocidade e extensão, diâmetro da raiz, distância entre as raízes, pêlos absorventes) e os que descrevem a cinética de absorção de nutrientes ( $I_{max}$ ,  $K_m$ ,  $C_{min}$ ) pelas espécies (MALAVOLTA et al., 1997).

A taxa de absorção de um nutriente depende da sua concentração na solução do solo junto as raízes, o que está diretamente relacionado com o coeficiente de partição ( $K_d$ ) do nutriente. Essa taxa de absorção pode ser descrita pela cinética de Michaelis-Menten (CLAASSEN; BARBER, 1974). A integração do modelo de cinética de absorção iônica com o  $K_d$ , permite estimar o teor do nutriente no solo, necessário para que as plantas iniciem a absorção e atinjam o influxo máximo ( $I_{max}$ ). Ela leva em consideração a capacidade do solo de fornecer o nutriente para a solução e a da planta para absorve-lo, contribuindo para o aprimoramento do manejo da fertilização.

Os modelos mecanísticos pressupõem um entendimento dos processos envolvidos na transferência dos nutrientes do solo para as plantas. Desde que funcionem adequadamente, permitem avaliar a importância de cada um dos parâmetros da planta e/ou do solo na absorção dos nutrientes e no efeito do manejo do solo e da adubação através da medição de parâmetros afetados por essas práticas (ANGHINONI et al., 1989).

Depois que é desenvolvido e validado o modelo mecanístico é capaz de prever satisfatoriamente a absorção de nutrientes, em condições de variação de atributos do solo e características da planta. Isso possibilita entender melhor os processos que estão envolvidos na absorção de nutrientes e dessa forma, contribuir para o aperfeiçoamento de métodos mais eficazes de avaliação da disponibilidade dos nutrientes para as plantas (MEURER; ANGHINONI, 1994).

Esses autores ao utilizarem o modelo mecanístico de Barber-Cushman para avaliar a disponibilidade de K em solos com diferentes características mineralógicas e difusivas, submetidos a diferentes doses de K, concluíram que o modelo estimou satisfatoriamente a absorção de K por plantas de sorgo.

Parâmetros de solo e de plantas que determinam a disponibilidade dos nutrientes, quando são avaliados de forma independente e inseridos em modelos de absorção, permitem avaliar de forma correta a disponibilidade dos nutrientes e assim determinar a utilização dos fertilizantes adicionados ao solo, de forma mais eficiente (VARGAS et al., 1983).

## **2.9. O método da linha de fronteira (LF) e suas aplicações**

O método da LF foi proposto inicialmente por Webb (1972) para análise de dados biológicos e pode ser interpretado em termos da Lei do Mínimo de Liebig (SHATAR; McBRATNEY, 2004; MILNE et al., 2006). Essa linha define o melhor desempenho na população e encontra-se na borda de qualquer corpo de dados, daí o nome "Linha de Fronteira" e ocorre sempre que existe uma relação de causa e efeito entre duas variáveis (EVANYLO; SUMNER, 1987).

A linha de fronteira descreve o efeito limitante de uma variável independente em relação à variável dependente. Assim, assume-se que todos os outros valores que se encontram abaixo dela resultam da influência de outra variável independente ou da combinação de variáveis que estão limitando a variável dependente (WEBB, 1972; BLANCO-MACÍAS et al., 2010).

Para utilização do método da LF para um conjunto de dados, é necessário a elaboração de um diagrama de dispersão, relacionando a variável dependente (rendimento de uma cultura) contra a variável independente, que pode ser uma característica do solo ou da planta (por exemplo, o teor de um nutriente no solo ou na folha). Na sequência são eliminados alguns pontos (outliers), deixando-se apenas os que estão localizados na borda e ajusta-se então um modelo polinomial para obter o valor ótimo do fator independente (WEBB, 1972; MAIA; MORAIS, 2016; ALI, 2018).

O método da LF tem sido utilizado na área de diagnose nutricional para o estabelecimento normas e teores foliares ótimos de nutrientes para algumas culturas como, milho (WALWORTH et al., 1986), palmeiras (BHAT; SUJATHA, 2013), meloeiro (MAIA; MORAIS, 2016), mangueira (ALI, 2018) eucalipto

(FERNANDES, 2010; GALDINO, 2015) e na área de fertilidade do solo, na determinação de valores críticos e ótimos de nutrientes no solo para várias culturas (EVANYLO; SUMNER, 1987; SCHNUG et al., 1996; SHATAR; McBRATNEY, 2004; WAIREGI et al., 2010; BHAT et al., 2012; SOUSA et al., 2018).

A LF permite também determinar, dentre vários fatores, aqueles que mais limitam a produtividade das culturas e a importância relativa de cada um deles (FERMONT et al., 2009; WANG et al., 2015). Esses autores verificaram por meio da LF, que dentre os fatores de produção estudados, a baixa fertilidade do solo foi o fator que mais limitou a produtividade da mandioca no Quênia e em Uganda e do cafeeiro em Uganda, respectivamente.

O método da LF apresenta como vantagem indicar a produtividade máxima obtida sob uma faixa de valores de um fator de produção particular, enquanto que a análise de regressão prevê a resposta média de produtividade, em vez de a melhor resposta (WANG et al., 2015). Além disso, para o seu uso, não há necessidade que os dados sejam provenientes de trabalhos de correlação, os mesmos podem ser provenientes de culturas comerciais que apresentem alta produtividade.

#### **2.10. O método do diagrama de quadrantes do relacionamento planta-solo (DQRps)**

O método DQRps foi desenvolvido por Sousa (2016) e tem como propósito plotar em um sistema de coordenadas cartesianas, um conjunto de pontos obtidos do relacionamento de uma variável dependente ( $y$ ) em função de uma variável independente ( $x$ ). Sobre a nuvem de pontos obtida do relacionamento é elaborado um diagrama que é dividido em quatro quadrantes (I, II, III, IV).

O método foi desenvolvido para relacionar o teor do nutriente no solo em função do teor foliar, e utilizou como critério de separação dos quadrantes o nível crítico do nutriente no solo, traçando uma linha vertical perpendicular ao eixo das abcissas ( $x$ ) e o teor foliar médio do banco de dados, traçando uma linha horizontal perpendicular ao eixo das ordenadas ( $y$ ). Depois de separados, aos pontos presentes nos quadrantes III e I é ajustado um modelo matemático para

obter as curvas de resposta foliar de nutrientes em função da disponibilidade de nutrientes no solo (SOUSA et al., 2018).

A escolha apenas dos quadrantes III e I para ajuste do modelo, parte do pressuposto de que de que as lavouras presentes no quadrante II do diagrama estão sob o efeito de concentração do nutriente no tecido foliar em função de uma baixa produtividade, enquanto as lavouras presentes no quadrante IV estão sob efeito de diluição, ou seja, apresentam baixos teores de nutrientes no tecido foliar atrelado a altas produtividades (SOUSA, 2016).

O DQRps foi utilizado por Sousa et al. (2018) e permitiu relacionar à análise foliar do cafeeiro com a análise química do solo e obter faixas de suficiência foliar para a cultura. Os autores constataram que as faixas obtidas por esse método são confiáveis e estão em acordo com as obtidas na literatura.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas, compreendendo na primeira, a realização de um ensaio de adsorção de K para determinação do coeficiente de partição do nutriente ( $K_d$ ), relaciona-lo com as constantes cinéticas de absorção do K pelo eucalipto e obter o influxo de K em condições de solo, visando aprimorar o modelo FertiCalc-Eucalipto quanto ao módulo suprimento pelo solo. A segunda etapa objetivou quantificar o acúmulo de nutrientes pelo eucalipto e determinar classes de fertilidade do solo e faixas de suficiência de nutrientes nas folhas, utilizando o método da linha de fronteira (LF).

#### 3.1. Determinação do $K_d$ no solo e do influxo de K das plantas

Foram coletadas amostras da camada de 0-30 cm de sete solos com ampla variabilidade em relação aos atributos químicos, físicos e mineralógicos, provenientes de sete localidades produtoras de eucalipto na região Centro-Leste de Minas Gerais, em áreas pertencentes a empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA S.A.) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Classificação, localidade e município de procedência dos solos utilizados.

Solo	Local	Município
Neossolo Flúvico - (RU-SF)	Santa Fé	Bom Jesus do Galho - MG
Latossolo Vermelho - (LV-BII)	Babilônia II	São João Evangelista - MG
Latossolo Vermelho - (LV-BO)	Borges	Divinolândia de Minas - MG
Latossolo Vermelho - (LV-CO)	Correntinho I	Sabinópolis - MG
Latossolo Vermelho-Amarelo - (LVA-BA)	Batinga	Santana do Paraíso - MG
Latossolo Vermelho-Amarelo - (LVA-BV)	Boa Vista IV	Naque - MG
Latossolo Vermelho-Amarelo - (LVA-VII)	Valéria II	Santa Bárbara - MG

As amostras de solo foram secas ao ar (TFSA), destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, homogeneizadas e, posteriormente, caracterizadas quanto a atributos químicos, físicos e mineralógicos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Caracterização química, física e mineralógica dos solos estudados.

Características	Solos <sup>1/</sup>						
	RU-SF	LV-BII	LV-BO	LV-CO	LVA-BA	LVA-BV	LVA-VII
MO (g/kg) <sup>2/</sup>	10,3	49,6	46,5	45,3	44,4	37,3	19,5
K <sup>+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>3/</sup>	83,91	6,55	26,97	6,55	12,35	13,86	16,13
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>4/</sup>	1,37	0,06	0,10	0,02	0,05	0,11	0,08
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>4/</sup>	0,44	0,03	0,09	0,02	0,04	0,07	0,04
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>4/</sup>	0,00	1,40	1,02	1,04	0,72	1,54	1,52
H + Al (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>5/</sup>	2,05	12,87	11,29	10,27	10,80	10,03	6,70
t (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	2,22	1,52	1,35	1,12	0,89	1,80	1,73
T (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	4,27	12,99	11,61	10,34	10,97	10,29	6,91
SB (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	2,02	0,11	0,26	0,06	0,20	0,21	0,16
P-rem (mg/L) <sup>6/</sup>	33,88	3,93	4,87	3,38	1,47	8,31	11,46
Areia (%) <sup>7/</sup>	67,0	23,0	30,0	6,0	58,0	22,0	40,0
Silte (%) <sup>7/</sup>	12,0	9,0	11,0	12,0	7,0	7,0	13,0
Argila (%) <sup>7/</sup>	21,0	68,0	59,0	82,0	35,0	71,0	47,0
DS (kg/dm <sup>3</sup> ) <sup>7/</sup>	1,21	1,01	1,07	0,9	1,07	1,01	1,08
EU (dag/kg) <sup>7/</sup>	16,0	30,0	28,0	33,0	20,0	26,0	24,0
Caulinita (dag/kg) <sup>8/</sup>	24,1	37,6	26,7	34,3	12,8	42,3	31,0
Gibbsita (dag/kg) <sup>8/</sup>	8,3	26,9	33,3	41,3	25,1	24,7	17,1
Hematita (dag/kg) <sup>8/</sup>	0,0	12,2	12,6	11,5	0,9	11,0	0,0
Goethita (dag/kg) <sup>8/</sup>	4,4	0,6	0,6	0,6	6,0	0,5	4,8

<sup>1/</sup> Solos: RU – Neossolo Flúvico; LV – Latossolo Vermelho; LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo. Localidades: SF – Santa Fé; BII – Babilônia II; BO – Borges; CO – Correntinho I; BA – Batinga; BV – Boa Vista IV; VII – Valério II. MO – Matéria orgânica; t – Capacidade de troca catiônica efetiva; T – Capacidade de troca catiônica potencial; SB – Soma de bases trocáveis; P-rem – Fósforo remanescente; DS – Densidade do solo; EU – Equivalente de umidade. <sup>2/</sup> Walkley-Black; <sup>3/</sup> Mehlich-1; <sup>4/</sup> KCl 1 mol/L; <sup>5/</sup> CaOAc 0,5 mol/L a pH 7,0; <sup>7/</sup> Método da proveta (Embrapa, 1997); <sup>8/</sup> Alvarez V. et al. (2000). <sup>9/</sup> Resende et al. (1987).

Cada amostra de solo foi dividida em 18 subamostras de 5 g cada. Para o estudo de adsorção, foram adicionadas seis doses de K (0, 10, 20, 40, 80 e 160 mg/L), com três repetições. Essas doses foram adicionadas mediante soluções, utilizando como fonte o KCl, na relação solo: solução de 1:10 (peso: volume).

Após a aplicação das doses de K, as subamostras de solo foram agitadas por 1 h e em seguida o material foi filtrado em papel filtro. Posteriormente, foram coletadas alíquotas das soluções de equilíbrio para determinação dos teores de K por fotometria de emissão de chama. Por diferença entre as doses aplicadas e os teores na solução de equilíbrio, foram calculadas as quantidades de K adsorvidas em cada solo.

Regressões lineares foram ajustadas para as concentrações de K adsorvidas à fase sólida do solo (y) em função da sua concentração na fase líquida (x), utilizando o software SigmaPlot 12.5. Pela relação entre estas, foi calculado o coeficiente de partição (Kd) de K para cada solo, considerando a declividade da função linear. Posteriormente os valores de Kd foram correlacionados com os atributos do solo (argila, MO, P-rem, EU, CTC e DS).

Para calcular as taxas de absorção de K (influxo), em função do teor do elemento no solo, foram utilizados o coeficiente de partição (Kd) do elemento obtido para cada solo e os parâmetros cinéticos (Imax, Km, Cmin) determinados para mudas de eucalipto (LIMA et al., 2005), devido à inexistência na literatura de valores destes parâmetros e à grande dificuldade em determiná-los para plantas adultas de eucalipto. Porém, para cafeeiro da cultivar Catuaí Vermelho os valores de Km e Cmin obtidos na fase de mudas (SOUZA, 2015) são da mesma ordem dos encontrados em plantas com cinco anos na fase de expansão rápida dos frutos (PINTO, 2016).

As taxas de absorção de K (influxo) foram calculadas para o clone mais eficiente (> Imax e < Km, Cmin), menos eficiente (< Imax e > Km, Cmin) e de eficiência média (Imax, Km e Cmin médio), utilizando a equação de Michaelis-Menten, modificada por Claassen e Barber (1974):

$$I = \frac{I_{\max} (C - C_{\min})}{K_m + (C - C_{\min})}$$

Onde: I = influxo ou velocidade de absorção do íon ( $\mu\text{mol/g/h}$ ); C = concentração externa do íon ( $\mu\text{mol/L}$ ); Imax = influxo ou absorção máxima ( $\mu\text{mol/g/h}$ ); Km = constante de Michaelis-Menten, uma medida da afinidade do carregador pelo íon e corresponde a  $\frac{1}{2}$  do Imax ( $\mu\text{mol/L}$ ); Cmin = concentração do íon na solução junto às raízes, quando o influxo líquido é igual a zero ( $\mu\text{mol/L}$ ).

Para obter a concentração de K junto às raízes (C) para ser usada no modelo do influxo, foram atribuídos valores iniciando em 5,1  $\mu\text{mol/L}$  (correspondente ao Cmin médio do eucalipto) com intervalo de 0,4 até 250  $\mu\text{mol/L}$  para obter o influxo máximo (Imax). Essas concentrações foram convertidas (mg/L), multiplicadas pelo Kd (L/kg) determinado para cada solo e

pela sua respectiva densidade, obtendo-se o teor de K nos solos estudados, em unidade correspondente à determinada em uma análise de rotina ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ).

Seguindo esse mesmo procedimento, o teor de K no solo foi obtido utilizando o Kd estimado com base no teor de argila e feita uma análise de correlação entre o teor de K obtido utilizando o Kd medido e o teor de K obtido com o Kd estimado, visando verificar a confiabilidade de determinar o Kd com base em argila.

Com base no modelo do influxo foi proposto um fator de sustentabilidade nutricional considerando o teor de K ( $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) em cada solo, referente ao Cmin e um fator que condiciona a máxima absorção de K pelas plantas de eucalipto, considerando o teor de K que proporcionou 98 % do I<sub>max</sub> (para manter uma margem de segurança na fertilização, ao invés de trabalhar no limite), para aprimorar o módulo suprimento do sistema FertiCalc-Eucalipto (BARROS et al., 1995).

Estimando o Kd para solos com teores de argila de 4, 10, 21, 35, 47, 59, 68, 71, 82 e 90 % (assumindo densidade aparente do solo - DS =  $1 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ), seguiu-se os mesmos procedimentos já descritos para obter o teor de K no solo. Em seguida foi proposta uma equação para estimar o teor de K que proporciona 98 % do I<sub>max</sub> e uma equação que indique a dose de K<sub>2</sub>O ( $\text{kg}/\text{ha}$ ) que deve ser aplicada para obter esse teor no solo, ambos levando em consideração o teor de argila.

### **3.2. Acúmulo de nutrientes pelo eucalipto**

Para quantificar o acúmulo de nutrientes por povoamentos de eucalipto e obter as classes de fertilidade do solo e faixas de suficiência nutricional em folhas para a cultura, foi utilizado um banco de dados contendo informações de produtividade, teores de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) na folha, casca, lenho e galho, e de atributos químicos do solo (MO, P, K, Ca e Mg). Esses dados são provenientes de áreas cultivadas com *Eucalyptus grandis*, com idade variando de 72 a 153 meses, plantados no espaçamento de 3 x 2 m, em seis localidades: Cocais (CO), Piracicaba (PI), Rio Doce (RD), Sabinópolis (SA), Santa Bárbara (SB) e Virginópolis (VI), na região Centro-Leste de Minas Gerais (Tabela 3), num total de 689 talhões em áreas da empresa Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA S.A.).

**Tabela 3.** Localização geográfica e altitude das localidades estudadas.

Localidade	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Cocais	19° 23' 41''	42° 47' 11''	950
Piracicaba	19° 39' 02''	43° 01' 07''	880
Rio Doce	19° 09' 34''	42° 25' 07''	480
Sabinópolis	18° 41' 09''	42° 56' 56''	880
Santa Bárbara	20° 00' 29''	43° 21' 50''	820
Virginópolis	18° 40' 03''	42° 30' 08''	860

Os dados dos talhões foram distribuídos por localidades da seguinte maneira: Cocais (n = 129 talhões), Piracicaba (n = 143), Rio Doce (n = 36), Sabinópolis (n = 138), Santa Bárbara (n = 121) e Virginópolis (n = 122). Devido as diferenças entre localidades e idade dos plantios, optou-se por trabalhar com a produtividade em escala relativa, semelhante ao que é adotado nos trabalhos de calibração para avaliação da fertilidade do solo.

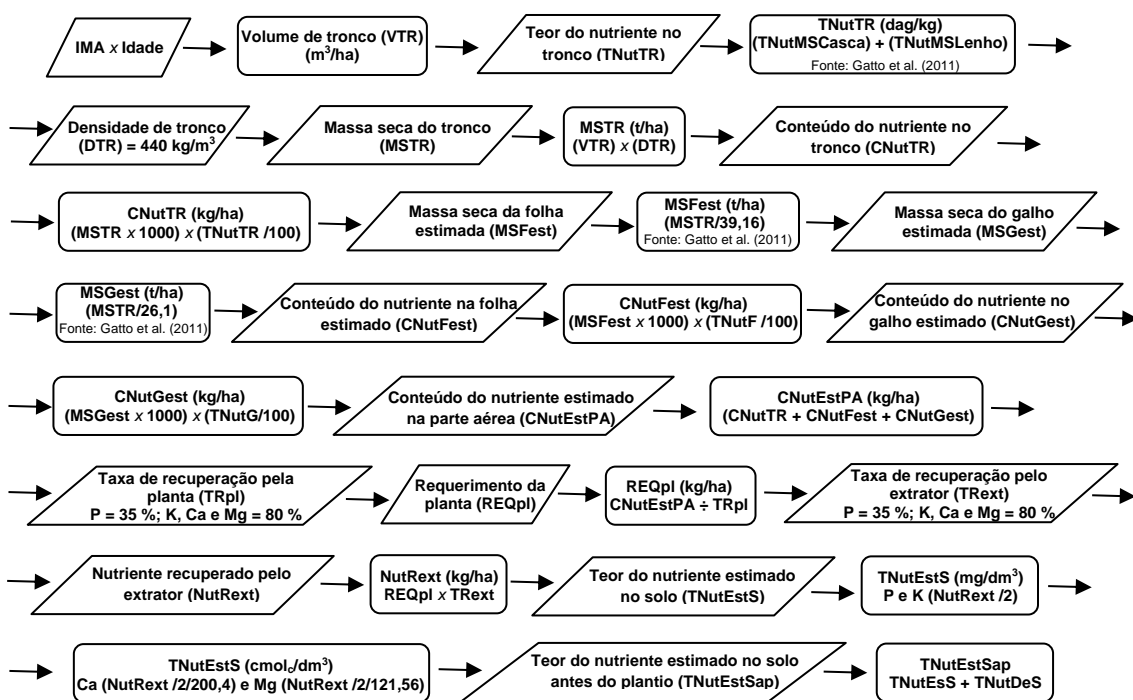
Pela classificação de Köppen, o clima predominante na região de CO é do tipo Cwb, mesotérmico de inverno seco e verão ameno, com temperaturas abaixo de 22 °C. Na região de RD predomina o clima tipo Aw, tropical, com verão chuvoso e inverno seco de maio a setembro. Nas regiões de SB, PI, VI e SA, é do tipo Cwa, temperado chuvoso-mesotérmico, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C e a do mês mais quente superior a 22 °C, com as chuvas ocorrendo predominantemente no verão e, inverno com baixas precipitações (CENIBRA, 2001).

Para determinação dos teores foliares, foram coletadas amostras de folhas maduras (totalmente expandidas) do terço médio da copa e terço médio dos galhos, seguindo o manejo adotado pela empresa. O N foi determinado pelo método Kjeldahl; P pelo método do ácido ascórbico, modificado por Braga e Defelipo (1974); K, por fotometria de emissão de chama; Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica.

As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade no final do ciclo e, posteriormente, foram secas e passadas em peneira com malha de 2 mm. Nessas amostras foram determinados P e K, extraídos com Mehlich-1, Ca e Mg extraídos com KCl 1 mol/L, e carbono orgânico pelo método e Walkley-Black (EMBRAPA, 1997).

Para estimar os teores de P, K, Ca e Mg no solo (0 -20 cm), que existiam na área no início do plantio, foi feito o somatório dos teores obtidos na análise

química do solo (final do ciclo) com os teores estimados a partir da quantidade de nutrientes acumulados na parte aérea das plantas no final do ciclo, conforme apresentado abaixo (Fluxograma 1).



**Fluxograma 1.** Passos utilizados para obtenção do teor estimado dos nutrientes (P, K, Ca e Mg) no solo (0 - 20 cm) antes do plantio.

Para converter os nutrientes acumulados na parte aérea das plantas em teores no solo (Fluxograma 1), foi obtido inicialmente o volume de tronco, multiplicando o IMA do talhão pela sua respectiva idade. O teor do nutriente no tronco foi obtido pelo somatório do teor na casca com o teor no lenho, considerando a partição obtida por Gatto et al. (2011). Multiplicando o volume de tronco pela densidade, obteve-se a massa seca de tronco. Esta foi multiplicada pelo teor de nutriente no tronco obtendo-se o conteúdo no respectivo órgão.

A massa seca das folhas e dos galhos foi estimada considerando sua proporção em relação ao tronco e a partição obtida por Gatto et al. (2011). Posteriormente essa massa foi multiplicada pelos seus respectivos teores e foram estimados os conteúdos. Estes foram somados ao conteúdo do tronco e obteve-se o conteúdo de nutrientes na parte aérea.

Após dividir o conteúdo de nutrientes na parte aérea pela taxa de recuperação da planta e multiplicar o resultado pela taxa de recuperação do extrator, obteve-se o teor do nutriente recuperado pelo extrator. Este foi dividido

por dois (P e K) e ainda pela massa atômica (Ca e Mg) para converter kg/ha em mg/dm<sup>3</sup> e cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, respectivamente, obtendo-se o teor de nutriente estimado no solo (correspondente ao acumulado na parte aérea). Pela soma do teor estimado com o da análise química (final do ciclo) foi estimado o teor de P, K, Ca e Mg existente no solo antes do plantio (Fluxograma 1).

Para quantificar o acúmulo mínimo e máximo de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea do eucalipto em função do volume de tronco produzido, gráficos de dispersão foram obtidos do relacionamento entre o conteúdo estimado desses nutrientes na parte aérea (y) e o volume de tronco (x). Utilizando o método da linha de fronteira (WEBB, 1972), foram selecionados os pares de pontos (y,x) referentes a região superior (fronteira superior) e região inferior (fronteira inferior) da nuvem de pontos do relacionamento, com o auxílio do aplicativo computacional “Boundary Fit” desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Posteriormente, foram geradas equações de regressão com os pares de pontos, selecionando as equações de melhor ajuste aos dados, levando em consideração a significância do modelo, o significado biológico e o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) das equações. De posse dessas equações, foi calculada a quantidade de nutrientes acumulada na parte aérea das plantas localizadas na fronteira superior e inferior, para volumes de tronco variando de 40 a 600 m<sup>3</sup>/ha.

Devido ao fato de o K ser aplicado em grandes quantidades nos plantios de eucalipto, o conteúdo desse nutriente na parte aérea das plantas da região superior e inferior, foi relacionado com o conteúdo de N, P, Ca e Mg, nas mesmas condições e nas mesmas plantas, para verificar a influência da absorção do nutriente sobre a absorção dos demais.

### **3.3. Obtenção de classes de fertilidade do solo para eucalipto**

Para estimar as classes de fertilidade do solo pelo método da LF, foram elaborados gráficos de dispersão relacionando o Incremento Médio Anual relativo – IMA relativo (IMA relativo = IMA de cada talhão / maior IMA dentre os talhões × 100), obtido em cada talhão (y), com os teores de MO, P, K, Ca e Mg no solo, do respectivo talhão (x), com correção para outliers. Em seguida, com o auxílio do aplicativo computacional “Boundary Fit”, foram selecionados os pares de pontos (y,x) da região da fronteira superior da nuvem de pontos.

Os pontos selecionados foram usados para obter as equações de regressão, selecionando-se as de melhor ajuste, levando em consideração a significância do modelo, seu significado biológico e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Posteriormente, com base nessas equações, foram estimadas as classes de fertilidade do solo: Baixa (IMA relativo < 70 %), Média ( $70 \leq$  IMA relativo < 90 %), Adequada ( $90 \leq$  IMA relativo < 100 %), Alta ( $100 \geq$  IMA relativo > 90, à direita do máximo), Muito Alta ( $90 \geq$  IMA relativo > 70, à direita do máximo), Excessiva (IMA relativo  $\leq$  70 %, a direita do máximo).

### **3.4. Obtenção de faixas de suficiência foliar para eucalipto**

Obtidas as classes de fertilidade do solo, os teores foliares de N, P, K, Ca e Mg (y), foram plotados com os teores de MO, P, K, Ca e Mg, no solo, respectivamente (x), num sistema de coordenadas cartesianas. Posteriormente foi utilizado o método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps) desenvolvido por Sousa et al. (2018). Esse método consistiu em separar em quatro quadrantes (I, II, III e IV), o conjunto de pontos, proveniente do relacionamento entre o teor foliar e teor no solo, usando linhas tracejadas horizontais e verticais.

Para traçar a linha horizontal, perpendicular ao eixo das ordenadas (y) foi utilizado como critério, os teores foliares médios do banco de dados (19,15; 1,04; 8,07; 4,36 e 1,93 g/kg, respetivamente de N, P, K, Ca e Mg). Para traçar a linha vertical, perpendicular ao eixo das abscissas (x), foram usados os níveis críticos (IMA relativo = 90 %) obtidos para cada nutriente no solo e para o teor de MO pelo método da LF, como proposto por Sousa et al. (2018).

A curva de resposta foliar do relacionamento entre teor foliar (y) e teor no solo (x) para cada nutriente e MO, utilizando o método DQRps, foi determinada considerando apenas os quadrantes III e I (quadrantes positivos), por serem aqueles em que há resposta positiva do teor foliar de nutrientes, e conseqüentemente da produtividade (SOUSA, 2016; SOUSA et al., 2018). Posteriormente, equações de regressão foram ajustadas aos pares de pontos (y,x) que se encontram nos quadrantes III e I.

Para obtenção das faixas de suficiência foliar para o eucalipto, os valores dos níveis críticos (IMA relativo = 90 %) e ótimos (IMA relativo = 100 %) da MO e dos macronutrientes no solo obtidos pela LF, foram substituídos na equação

gerada pelo método do DQRps. Essas faixas, posteriormente, foram confrontadas com os teores foliares adequados, encontrados na literatura para a cultura do eucalipto.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Determinação do Kd no solo e do influxo de K das plantas

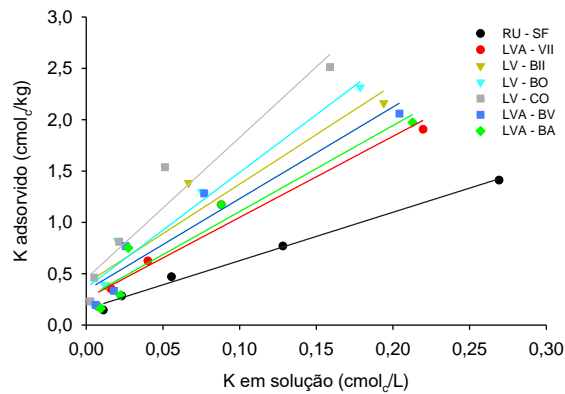
As equações ajustadas entre os teores de K adsorvidos à fase sólida do solo, e as concentrações de K em solução (Tabela 4), indicam que o modelo linear descreveu adequadamente a adsorção do elemento pelos solos estudados devido aos elevados coeficientes de determinação ( $R^2 \geq 0,90$ ).

**Tabela 4.** Equações de adsorção ajustadas entre os teores de K adsorvidos (y, em cmol<sub>c</sub>/kg) e em solução (x, em cmol<sub>c</sub>/L) e coeficiente de partição (Kd), em solos da região Centro-Leste de Minas Gerais.

Solos	Equações	R <sup>2</sup>	Kd
RU-SF	$\hat{y} = 0,1567 + 4,7071^{**}x$	0,993	4,7071
LV-BII	$\hat{y} = 0,4072 + 9,6539^{**}x$	0,893	9,6539
LV-BO	$\hat{y} = 0,3620 + 11,249^{**}x$	0,965	11,249
LV-CO	$\hat{y} = 0,4533 + 13,743^{**}x$	0,932	13,743
LVA-BA	$\hat{y} = 0,2668 + 8,3835^{**}x$	0,926	8,3835
LVA-BV	$\hat{y} = 0,3372 + 8,9343^{**}x$	0,921	8,9343
LVA-VII	$\hat{y} = 0,2587 + 7,8999^{**}x$	0,960	7,8999

Kd – (L/kg); Solos: RU - Neossolo Flúvico; LV - Latossolo Vermelho; LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo. Localidades: SF - Santa Fé; BII - Babilônia II; BO - Borges; CO - Correntinho I; BA – Batinga; BV - Boa Vista IV; VII - Valério II.

A adsorção de K foi intensificada com o aumento da concentração do elemento em solução, principalmente nos solos LV-CO, LV-BO, LV-BII e LVA-BV (Figura 1). Esses solos apresentam elevados teores de argila (82, 59, 68 e 71 %, respectivamente), indicando que, de modo geral, existe uma relação direta entre a quantidade de K adsorvido e a textura do solo (Tabela 2). Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Chaves e Kinjo (1987), que ao avaliarem a adsorção de K em solos da região Semiárida da Paraíba, verificaram que houve maior retenção do elemento nos solos mais argilosos.



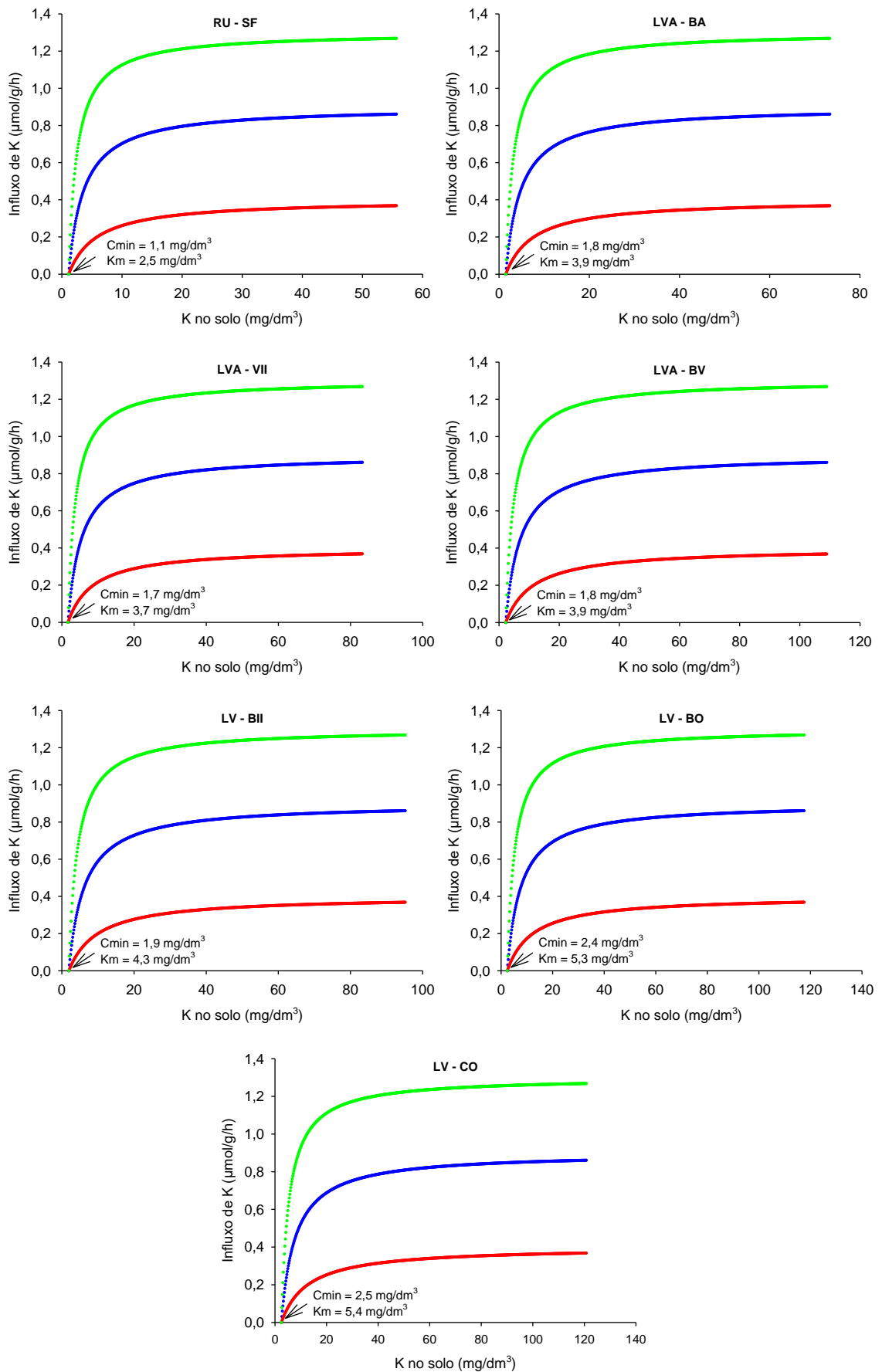
**Figura 1.** Isotermas de adsorção de K em solos da região Centro-Leste de Minas Gerais.

O conhecimento do teor de K adsorvido é de extrema importância, principalmente quando se comparam solos em relação à disponibilidade do elemento para as plantas, baseando-se apenas nos teores de K trocável (CHAVES; KINJO, 1987). Essa disponibilidade pode ser avaliada por meio do coeficiente de partição ( $K_d$ ) do nutriente entre a fase sólida ( $Q$ ) e a solução do solo ( $I$ ), a partir do qual determina-se o poder tampão do solo. Essa relação ( $Q/I$ ) possibilita uma estimativa da quantidade de K trocável que é necessária na fase sólida do solo para manter uma determinada concentração de K em solução (MEURER, 2006; ERNANI et al., 2007).

O maior  $K_d$  de potássio foi determinado no solo LV-CO, que apresenta maior teor de argila e o menor no solo RU-SF que possui menor teor de argila (Tabelas 2 e 4). Em treze solos de Minas Gerais, Prezotti e Defelipo (1987) também constataram que, de modo geral, o poder tampão de potássio (PTK) foi maior nos solos mais argilosos. Valores elevados de  $K_d$  indicam elevada retenção de elementos pela fase sólida do solo através de reações químicas, conduzindo a uma baixa disponibilidade para as plantas. Por outro lado, menores valores de  $K_d$  indicam que maior parte do elemento permanece em solução (SHAHEEN et al., 2013).

O influxo de K por unidade de peso fresco de raiz ( $\mu\text{mol/g/h}$ ) em função do teor do elemento no solo, variou com o tipo de solo e em virtude dos diferentes valores de  $K_d$  (Figura 2). Ao comparar o solo RU-SF, que possui o menor  $K_d$  (4,71 L/kg) com o solo LV-CO que possui o maior  $K_d$  (13,74 L/kg), verifica-se que para manter uma concentração de 5,1  $\mu\text{mol/L}$  (0,1989 mg/L) de K em solução, que corresponde a concentração a partir da qual as plantas de eucalipto

na fase inicial de crescimento iniciam à absorção (LIMA et al., 2005), é necessário que o RU-SF tenha um teor mínimo de 1,1 mg/dm<sup>3</sup> e o LV-CO de 2,5 mg/dm<sup>3</sup> de K trocável (Figura 2). Esses resultados refletem as diferenças na disponibilidade de K entre os solos, o que é resultante da sua composição textural e mineralógica. A mineralogia determina as relações entre os fatores capacidade e intensidade que estão relacionados com a difusão de K até as raízes (MEURER; ANGHINONI, 1993).



**Figura 2.** Influxo de K em função do teor do nutriente no solo em clones de eucalipto de baixa, média e de alta eficiência quanto à absorção de K.

Os teores de K no solo necessários para manter uma concentração de 0,1989 mg/L do elemento em solução, para que ocorra absorção pelas plantas de eucalipto na fase inicial de crescimento (LIMA et al., 2005) variaram com a textura do solo (Figura 2). Nos solos mais argilosos (LV-BO, LV-BII, LVA-BV e LV-CO), para que as plantas iniciem a absorção, os teores de K devem ser no mínimo de 2,4; 1,9; 1,8 e 2,5 mg/dm<sup>3</sup>, respectivamente (Figura 2), desde que fatores que atuam na difusão do nutriente até as raízes, como o conteúdo volumétrico de água do solo (GIANELLO; MIELNICZUK, 1981; MEURER; ANGHINONI, 1994) e a densidade do solo, não sejam limitantes.

Os menores teores de K verificados em análises de solo de povoamentos de eucalipto encontram-se em torno de 3 a 5 mg/dm<sup>3</sup> de K, próximos do mínimo exigido pelas plantas para que iniciem a absorção. Quando não há limitação na chegada dos nutrientes às raízes, o Cmin não tem muita importância pois não limita a absorção. Entretanto, quando o suprimento pelo solo é pequeno, como ocorre em solos com baixa concentração de nutrientes ou em períodos de déficit hídrico, o Cmin exerce grande influência na absorção (HORN et al., 2006).

A absorção (influxo) de K pelos clones de eucalipto aumentou com os teores do elemento no solo e, conseqüentemente pela maior concentração em solução, independentemente do tipo de solo e da eficiência nutricional do clone (Figura 2). Nos menores teores de K no solo a absorção cresceu rapidamente e depois os incrementos foram mais ou menos constantes nos maiores teores, tendendo a um valor máximo assintótico. Numa concentração de 100 µmol/L de K em solução (3,8961 mg/L), constata-se que absorção de K foi de 87; 93,5 e 96,2 % do máximo absorvido, pelo clone menos eficiente, clone de média eficiência e clone mais eficiente, respectivamente (Figura 2).

É necessário ressaltar que clones mais eficientes quanto à absorção são particularmente importantes pois, permitem maior taxa de recuperação dos nutrientes aplicados via fertilização (PINTO et al., 2011). Entretanto, como o influxo representa a taxa de absorção por unidade de raiz, espécies ou variedades menos eficientes na aquisição de nutrientes podem ter a absorção compensada pelo maior desenvolvimento de seu sistema radicular (SANES et al., 2013).

A fertilização é uma prática necessária para garantir produtividades elevadas em plantios de eucalipto, e deve ser realizada no momento adequado e em quantidades suficientes que possam ser absorvidas pelas raízes, de modo

a evitar impactos negativos sobre o ecossistema (SILVA et al., 2013). Ao comparar os solos RU-SF ( $< K_d$ ) com o solo LV-CO ( $> K_d$ ), constata-se que para manter uma concentração de K em solução de 171,1  $\mu\text{mol/L}$  (6,6729 mg/L), correspondente a 98 % do  $I_{\text{max}}$ , é necessário que o primeiro solo tenha 38,0 mg/dm<sup>3</sup> e o segundo 82,5 mg/dm<sup>3</sup> de K trocável (Figura 2). Tal fato indica que, a adubação com doses elevadas de K em plantios de eucalipto, deve levar em consideração além dos atributos do solo, a capacidade limitada e a variabilidade na eficiência de absorção de nutrientes entre espécies (FURTINI NETO et al., 1996; STAHL et al., 2013) e entre clones (LIMA et al., 2005; PINTO et al., 2011).

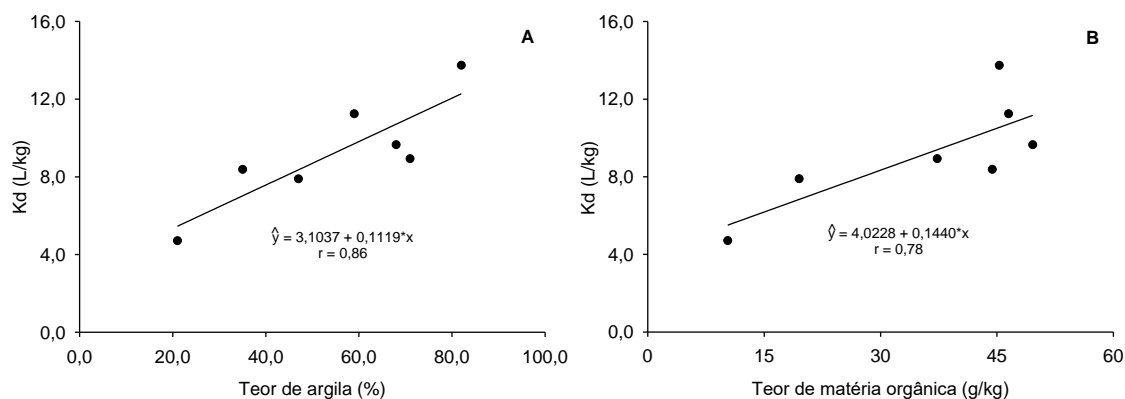
A integração do modelo de cinética de absorção iônica com a partição do K entre a fase sólida e solução do solo ( $K_d$ ) é de grande importância, pois, fornece informações que contribuem para o aprimoramento do manejo da fertilização em eucalipto. Ao considerar o influxo de K por plantas de eucalipto (Figura 2), constata-se que, em solos menos tamponados como o RU-SF ( $< K_d$ ), as fertilizações potássicas devem ser realizadas com doses menores e em aplicações mais frequentes, de forma a minimizar as perdas por lixiviação ou consumo de luxo pelas plantas. Por outro lado, solos mais tamponados, como o LV-CO ( $> K_d$ ) requerem adubações em maiores quantidades para manter uma concentração de K em solução semelhante à de solos menos tamponados (PREZOTTI; DEFELIPO, 1987; SILVA et al., 2000).

Solos com alto poder tampão e com baixa concentração de K em solução, não indicam necessariamente que a planta vai absorver pouco K, pois, a fase sólida tem a capacidade de repor constantemente o nutriente da solução quando este é absorvido pela planta ou lixiviado. Já nos solos menos tamponados, o K é facilmente liberado para solução e, quando submetidos a cultivos sucessivos sem uma reposição adequada de K, sua reserva será rapidamente esgotada (SANTOS et al., 2013).

#### **4.2. Correlação do $K_d$ com atributos do solo**

A partição de K fase sólida/fase líquida ( $K_d$ ) correlacionou-se com alguns atributos químicos e físicos do solo. O aumento dos teores de argila (Figura 3A) e de matéria orgânica (Figura 3B) do solo, contribuiu para maiores valores de  $K_d$  de K, o que implica em maior retenção desse elemento pelos colóides do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Chaves e Kinjo (1987) e Silva et al.

(2000) ao constatarem que o tipo e a percentagem de argila influenciaram positivamente a relação Quantidade/Intensidade (Q/I) de K em solos da Paraíba e em Latossolos de Minas Gerais, respectivamente, e que, dependendo destas propriedades do solo, o elemento pode ser menos ou mais facilmente liberado para a solução (CHAVES; KINJO, 1987).



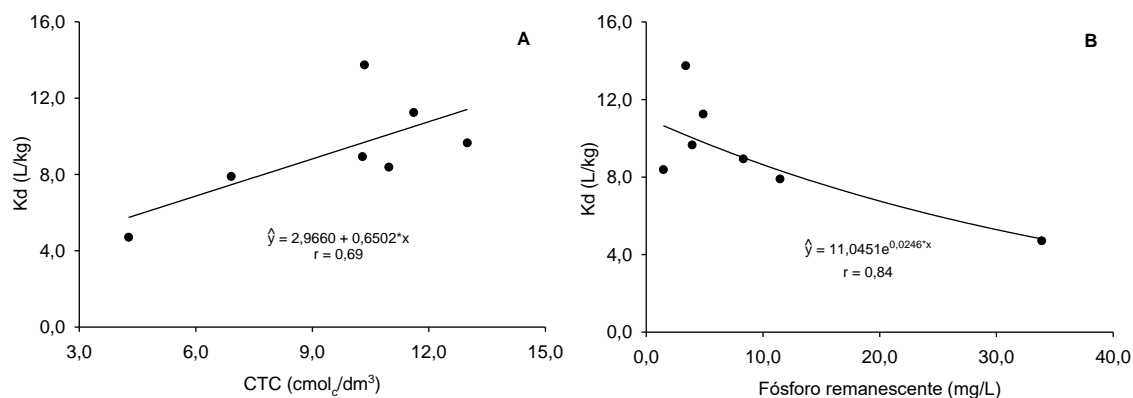
**Figura 3.** Correlação entre o coeficiente de partição (Kd) de K e os teores de argila (A) e de matéria orgânica (B) em solos da região Centro-Leste de Minas Gerais.

A influência dos teores de argila (Figura 3A) e de matéria orgânica (Figura 3B) sobre o Kd de K, indica que em solos pobres nesse nutriente, como é o caso de grande parte dos solos empregados no cultivo com eucalipto (LEITE et al., 2010; SILVA et al., 2013), estes atributos exercem maior controle na retenção e na liberação do K para solução.

Os minerais de argila e a matéria orgânica (MO) do solo são uma fonte significativa de cargas negativas na superfície dos coloides e exercem uma contribuição importante na capacidade de troca catiônica (CTC), implicando em maior retenção de cátions (BRAZ et al., 2013; SHAHEEN et al., 2013). Esses cátions que ficam adsorvidos nas superfícies da argila e da MO, estão numa forma prontamente disponível para as plantas e mantem um equilíbrio dinâmico com aqueles cátions que estão na solução. Assim, os cátions que são absorvidos pelas plantas são repostos para a solução por aqueles que estão na fase sólida (MEURER, 2007).

O aumento da CTC a pH 7,0 proporcionou maior retenção de K no solo e menor disponibilidade do elemento para a solução, fato comprovado pelos maiores valores de Kd (Figura 4A). Em solos da Paraíba, Chaves e Kinjo (1987)

e Santos et al. (2013), constataram que o poder tampão de potássio (PTK) correlacionou-se positivamente com a CTC a pH 7,0.



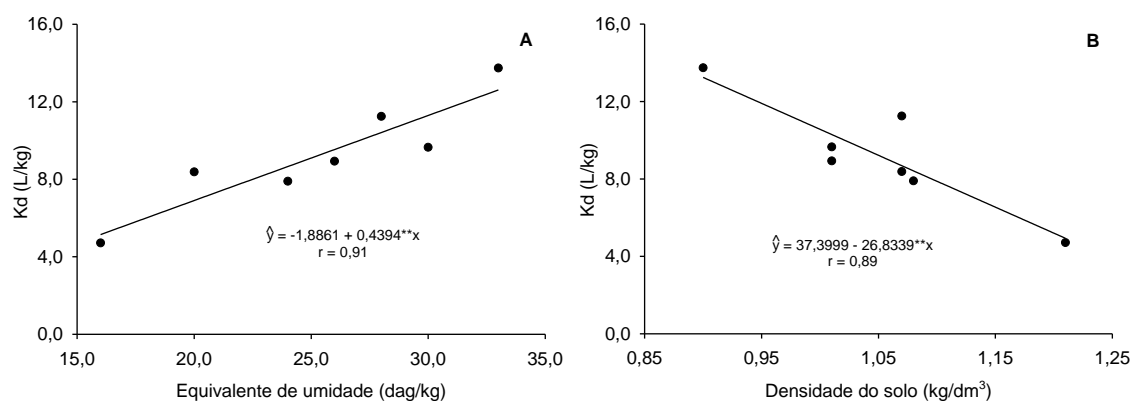
**Figura 4.** Correlação entre o coeficiente de partição (Kd) de K e a CTC a pH 7,0 (A) e os teores de fósforo remanescente (B) em solos da região Centro-Leste de Minas Gerais.

A influência da CTC nos valores de Kd de K nos solos pode ser devido ao efeito combinado da argila e da matéria orgânica que contribui com 20 a 90 % da CTC em solos tropicais (SILVA; MENDONÇA, 2007), que juntas atuam na retenção de cátions e diminuição das perdas de K por lixiviação. Os solos argilosos, em geral, possuem maiores teores de MO, maior CTC e maior número de sítios de adsorção quando comparados a solos arenosos, além de apresentarem uma maior superfície específica (FONTES; ALLEONI, 2006; SHAHEEN et al., 2013), sendo tal fato associado a uma maior retenção de K, visto que a adsorção é um fenômeno de superfície.

A CTC é o principal parâmetro na relação K trocável/K solução e está intimamente relacionada ao teor de matéria orgânica e ao teor de argila, o qual está associado à capacidade de retenção de água no solo, que afeta diretamente a difusão de K até as raízes (MEURER; ANGHINONI, 1993).

O fósforo remanescente (P-rem) é um atributo do solo que está relacionado com o seu poder tampão e pode indicar a capacidade do solo de reter certos elementos. Com o aumento do P-rem (Figura 4B), fato evidenciado em solos menos tamponados, o Kd de K decresceu exponencialmente, indicando que quanto menor o P-rem, maior a capacidade do solo de manter o K adsorvido. O efeito do P-rem sobre a partição de K solo/solução, está indiretamente relacionado com o teor de argila, tendo em vista que ambos se correlacionam negativamente (ALCÂNTARA et al., 2008; ROGERI et al., 2016).

O equivalente de umidade do solo (EU), correlacionou-se positivamente com o coeficiente de partição de K nos solos estudados (Figura 5A). Esses resultados são justificados devido ao fato de o EU, está correlacionado positivamente com o teor de argila (FARIAS et al., 2009). Desse modo, como o teor de argila (Figura 3A) atua na disponibilidade de K para a solução, características de solo que estão relacionadas com a mesma, em geral, seguirão a mesma tendência.



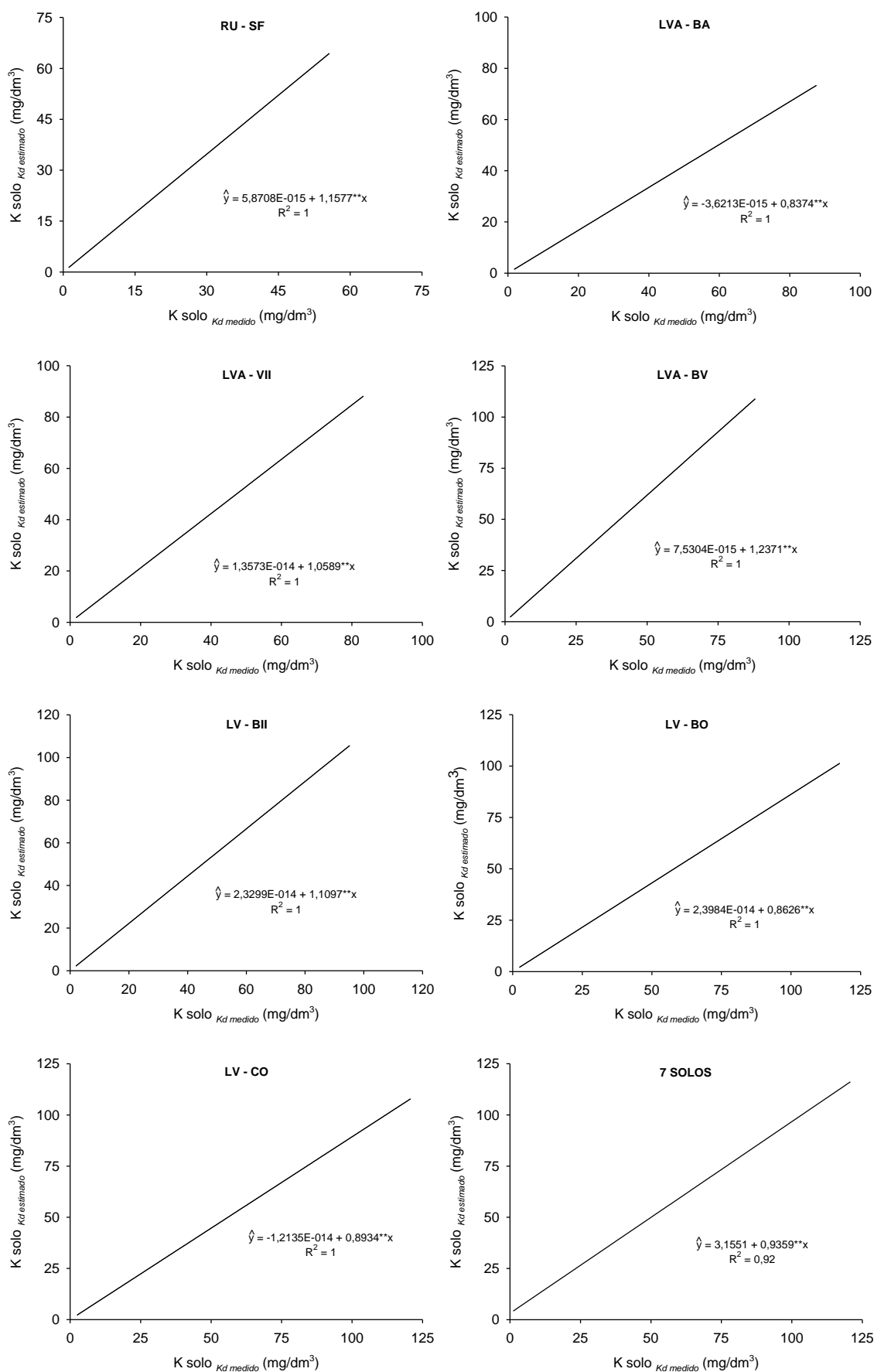
**Figura 5.** Correlação entre o coeficiente de partição (Kd) de K e o equivalente de umidade (A) e a densidade (B) em solos da região Centro-Leste de Minas Gerais.

O aumento da densidade do solo reduziu o Kd de K (Figura 5B), indicando que solos mais densos possuem menor capacidade de reter o elemento em seus constituintes sólidos. Tais resultados se justificam devido a existência de uma relação negativa entre o teor de argila e de matéria orgânica com a densidade do solo (MARCOLIN; KLEIN, 2011; LUCIANO et al., 2012), fato também observado nos solos utilizados (Tabela 2). Solos mais densos estão associados a partículas minerais de maior tamanho, menores teores de argila e de matéria orgânica, implicando menor CTC, atributos estes que são responsáveis pela maior retenção de cátions.

A adsorção de cátions, do ponto de vista da química do solo, é um fenômeno importante para determinar a mobilidade de elementos no solo e sua disponibilidade para as plantas. A biodisponibilidade de um elemento é determinada por uma competição entre o sistema radicular da planta, a solução do solo e a fase sólida do solo (FONTES; ALLEONI, 2006).

A relação entre o teor de K no solo obtido com o Kd medido e teor de K obtido pelo Kd estimado com base no teor de argila é apresentado na Figura 6.

De modo geral, o Kd foi estimado satisfatoriamente pelo teor de argila ( $R^2 = 0,92$ ), quando se considerou todos os sete solos (Figura 6). O modelo de obtenção do Kd com base no teor de argila estimou em 93,6 % o teor de K obtido com o Kd medido, considerando que a declividade da reta se aproximou da unidade ( $b = 0,9359$ ).



**Figura 6.** Relação entre o teor de K no solo, obtido com base no coeficiente de partição medido ( $K_{d \text{ medido}}$ ) e o estimado com base no teor de argila ( $K_{d \text{ estimado}}$ ).

Quando se considera os solos um a um, constata-se que o Kd estimado com base no teor de argila subestimou em 16,3 e 13,7 % o teor de K nos solos LVA-BA e LV-BO, respectivamente e superestimou em 15,8 e 23,7 %, respectivamente nos solos RU-SF e LVA-BV (Figura 6). O fato da determinação do Kd com base no teor de argila subestimar/superestimar o teor de K em alguns solos, indica que o poder tampão de K não é simplesmente dependente apenas do conteúdo de argila, mas de sua interação com a MO e com a mineralogia da fração argila (CHAVES; KINJO, 1987; SANTOS et al., 2013).

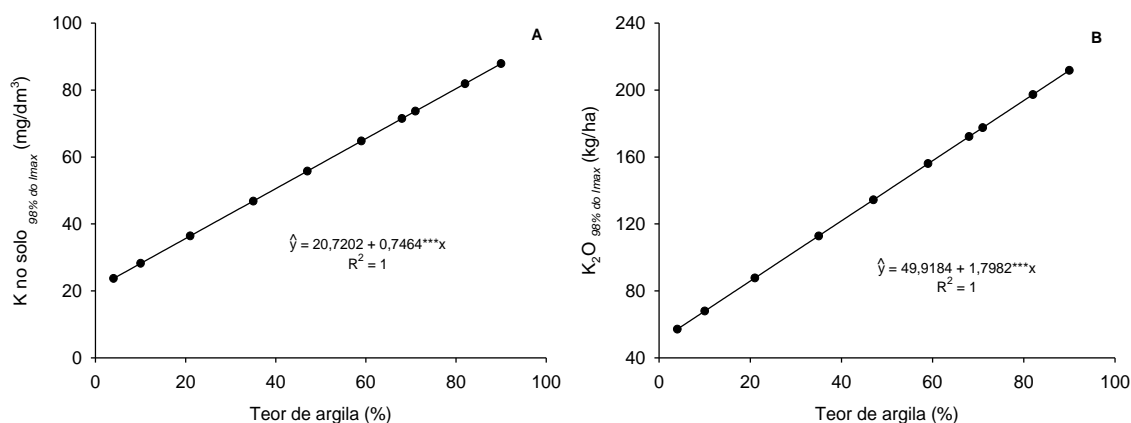
Os resultados indicam que, quando considerado um conjunto de solos com variabilidade nos atributos físicos, químicos e mineralógicos o Kd pode ser determinado com base no teor de argila. Deve-se enfatizar que a escolha pelo uso da argila deve-se a sua fácil determinação em análises de rotina, mas, além dela, outros atributos físicos e químicos do solo podem ser usados para estimar o Kd dos solos (Figuras 3, 4 e 5).

As doses de K aplicadas em plantios comerciais de eucalipto no Brasil, geralmente variam de 140 a 160 kg/ha de K<sub>2</sub>O para rotações médias de sete anos (GONÇALVES et al., 2013). Entretanto, para povoamentos estabelecidos em áreas de Cerrado, na Região Centro-Norte de Minas Gerais, recomenda-se de 100 a 200 kg/ha de K<sub>2</sub>O (SANTANA et al., 2014). Essas doses são parceladas em uma ou duas aplicações de cobertura, sendo 1/3 na primeira aplicação e o restante nas demais (GONÇALVES et al., 2008). Em alguns plantios a fertilização consiste na aplicação de 36, 67 e 151 kg/ha de K<sub>2</sub>O, aos 4, 12 e 24 meses, respectivamente (PINHEIRO et al., 2016). Entretanto, grande parte desses plantios, encontram-se em solos ácidos, com baixo teor de nutrientes, baixa CTC e alta drenagem, sendo propensos a lixiviação do K (GONÇALVES et al., 2008).

Para um melhor parcelamento da adubação potássica em plantios comerciais de eucalipto, é proposto abaixo um modelo que integra a textura do solo e o influxo de nutrientes pela planta (Figura 7). Para exemplificar a importância do modelo no parcelamento das doses de K, serão utilizados dados de alguns trabalhos realizados em áreas de plantios comerciais de eucalipto.

Considerando um solo com teor de argila de 6 % na camada de 10-20 cm (SILVA et al., 2013), constata-se que, pelo modelo proposto, para manter uma taxa de absorção de 98 % do I<sub>max</sub> por plantas de eucalipto (Figura 7A), os teores de K no solo devem ser de 25,2 mg/dm<sup>3</sup> e a quantidade de K<sub>2</sub>O aplicada de uma

única vez (Figura 7B), deve ser de 60,7 kg/ha, considerando, hipoteticamente, que o solo apresenta 0 mg/dm<sup>3</sup> de K trocável.



**Figura 7.** Relação entre o teor de argila e o teor de K no solo (A) teor de argila e a dose de K<sub>2</sub>O (B) que proporciona 98 % do I<sub>max</sub> de plantas de eucalipto.

É necessário destacar que no trabalho citado a fertilização de cobertura foi realizada em uma dose única, aos três meses após o plantio, com 105 kg/ha de K, quantidade usualmente utilizada pelas empresas do setor florestal na região e, que desse total, 38 % do K (40 kg/ha) foi lixiviado até uma profundidade de 0,9 m nos primeiros dois anos após o plantio (SILVA et al., 2013). Tal fato indica que, do total aplicado apenas 65 kg/ha de K permaneceu disponível para absorção pelas plantas, valor próximo dos 60,7 kg calculados com base no modelo, indicando que o modelo pode contribuir para aumentar a eficiência das fertilizações potássicas, principalmente em solos arenosos.

Utilizando um regime de fertilização usado em plantios comerciais de eucalipto, Pinheiro et al. (2016) aplicaram em cobertura 151 kg/ha de K<sub>2</sub>O aos 24 meses após o plantio. Considerando o teor de argila desse solo de 16 % (0-25 cm), constata-se que pelo modelo proposto a dose de K<sub>2</sub>O não deveria ultrapassar os 78,7 kg/ha (Figura 7B). Já Rodrigues et al. (2016) seguindo as recomendações do NUTRICALC<sup>®</sup> aplicaram em cobertura 52,8 e 70,4 kg/ha de K<sub>2</sub>O no 4<sup>o</sup> e no 13<sup>o</sup> mês em um solo com 20 % de argila, valor inferior aos 85,9 kg/ha de K<sub>2</sub>O considerado como limite máximo pelo modelo (Figura 7B).

O sistema de balanço apesar recomendar as doses de fertilizantes, não indica uma forma de parcelamento. Nesse sentido o uso do modelo proposto pode ser de grande importância no manejo da adubação, pois, tem como finalidade recomendar o parcelamento da adubação potássica, levando em consideração a capacidade do solo de reter o K e a capacidade da planta de

absorver este nutriente. Deve-se enfatizar que seu uso é visando um melhor parcelamento da adubação e que o mesmo não recomenda doses de adubo. Para recomendação de adubação potássica para eucalipto, Gonçalves et al. (2008) propõe que as doses de K aplicadas, devem levar em consideração além do teor de K trocável, o teor de argila do solo.

#### 4.2. Acúmulo de nutrientes pelo eucalipto

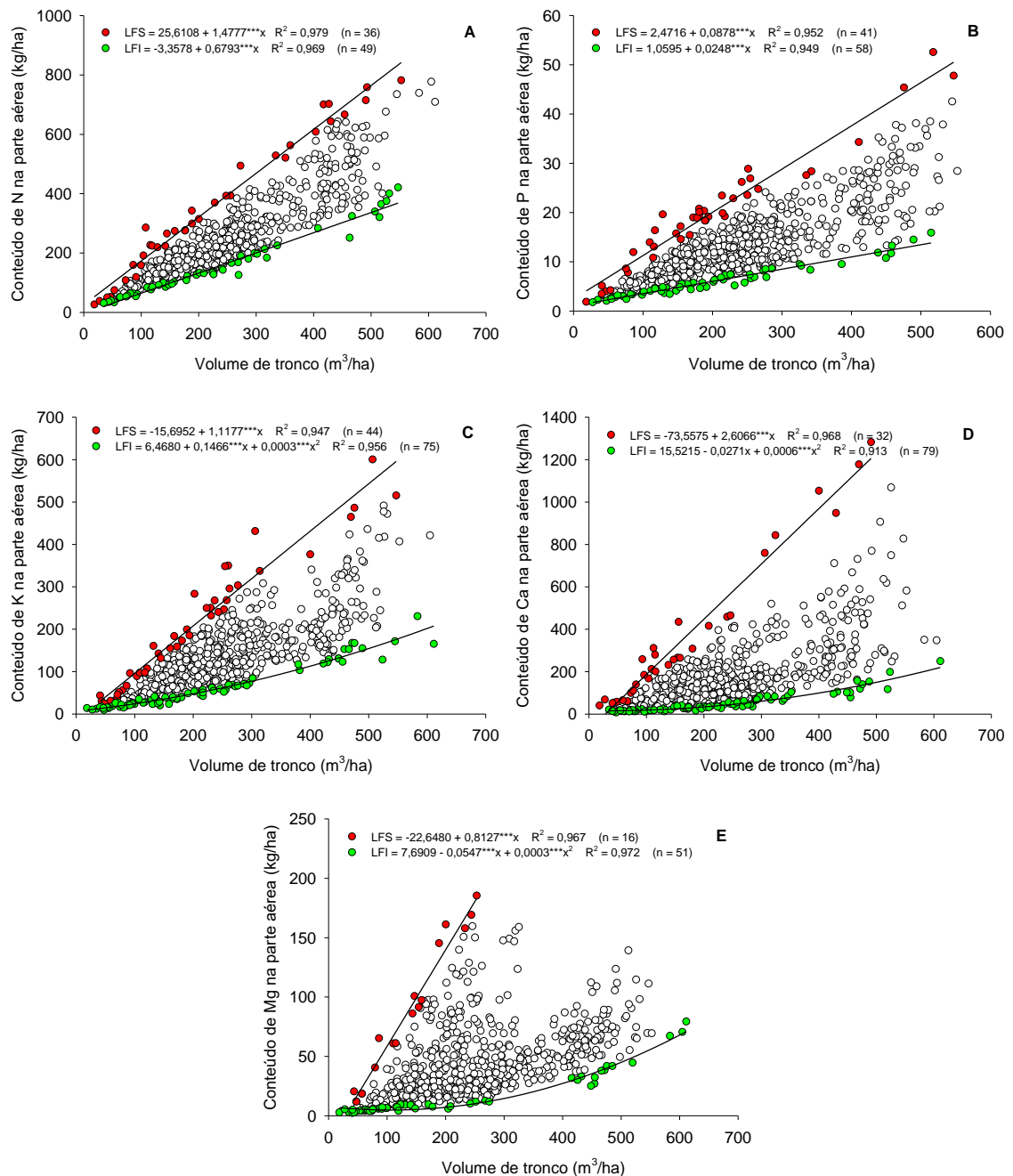
Os povoamentos de *Eucalyptus grandis*, dos quais foram obtidos os dados usados nesse trabalho, apresentavam idade variando de 72 a 153 meses, ou seja, próximas ou superiores à idade de corte comumente observada em plantios comerciais no Brasil. Os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 5, para o volume de tronco e conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea das plantas, indicam que houve uma alta dispersão dos dados, que variaram de 49,31 a 99,36 %.

**Tabela 5.** Resumo da estatística descritiva do volume de tronco e do conteúdo de macronutrientes na parte aérea das plantas de eucalipto.

Variável	Mínimo	Médio	Máximo	DP	CV (%)
Volume (m <sup>3</sup> /ha)	18,33	244,25	611,34	120,43	49,31
N (kg/ha)	26,57	247,23	782,31	146,79	59,37
P (kg/ha)	1,79	14,38	184,15	11,73	81,53
K (kg/ha)	9,68	132,82	1001,64	95,56	71,95
Ca (kg/ha)	7,63	173,26	1423,37	172,15	99,36
Mg (kg/ha)	2,30	44,57	361,33	38,79	87,03

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

O relacionamento do conteúdo de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) na parte aérea das plantas com o volume de tronco, usando o método da linha de fronteira (LF), permitiu definir duas populações de interesse, uma localizada na fronteira superior (LFS) e a outra na fronteira inferior (LFI) do conjunto de dados (Figura 8). É importante destacar que os dados usados para obter essas populações são provenientes de várias localidades da empresa, englobando diferentes condições de sítio e manejo. A definição dessas fronteiras dá uma ideia da eficiência nutricional dessas plantas e das práticas de manejo adotadas pela empresa florestal, principalmente no tocante a fertilização.



**Figura 8.** Diagramas de dispersão dos relacionamentos entre o volume de tronco e o conteúdo de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea de plantas de eucalipto da fronteira superior (LFS) e da fronteira inferior (LFI).

As plantas localizadas na LFI são aquelas que para uma mesma produtividade em volume, apresentaram menor conteúdo de nutrientes na parte aérea, o que caracteriza maior eficiência de utilização dos nutrientes absorvidos (Figura 8). Por outro lado, quando não há correspondência entre uma maior absorção de nutrientes e maior produtividade, como constatado nas plantas da LFS, maior quantidade de nutrientes será exportada na biomassa, sugerindo um

possível consumo de luxo pelas plantas (SANTANA et al., 1999), que pode ter sido ocasionado por um manejo nutricional inadequado.

Diferenças na utilização de nutrientes entre espécies, progênies e clones de eucalipto, além de serem inerentes à capacidade de absorção, translocação e conversão dos nutrientes em biomassa de cada genótipo, são produtos da interação do genótipo com o ambiente. Assim, a eficiência do uso de nutrientes permite reconhecer genótipos e práticas de manejo que possam contribuir para a sustentabilidade das florestas (ROSIM et al., 2016).

Do ponto de vista nutricional, plantas mais eficientes na utilização de nutrientes podem ser mais produtivas com um menor requerimento de nutrientes (FARIA et al., 2008). Isso possibilita reduzir as exportações de nutrientes proporcionalmente à biomassa de tronco produzida e removida do local, contribuindo para uma exploração florestal mais sustentável (ROSIM et al., 2016).

Os ganhos de produtividade e a quantidade de nutrientes absorvidos e acumulados por plantas de eucalipto variam com o sítio florestal, sendo definidos principalmente por fatores edafoclimáticos e de manejo nutricional (ALBAUGH et al., 2015; MELO et al., 2016; BINKLEY et al., 2017). Nesse contexto, pode se propor que as plantas que compõem a LFI (Figura 8) representam sítios de melhor qualidade, onde além da ótima condição nutricional, todos os demais fatores de produção estavam numa condição ótima ou muito próximos do ótimo, não havendo restrições no acúmulo de biomassa pelo eucalipto.

Pela observação das fronteiras (LFS e LFI), que indicam a diferença no conteúdo de macronutrientes na parte aérea de duas populações distintas para um mesmo volume de tronco, constata-se que nas menores produtividades, que condizem com as menores idades, a diferença no conteúdo dos nutrientes na parte aérea de ambas as populações é pouco expressiva (Figura 8). Entretanto, essa diferença aumenta com o ganho em volume de tronco, passando a ideia de que, nas plantas da LFS em idades mais avançadas a conversão dos nutrientes absorvidos em biomassa, não ocorre na mesma proporção que nas plantas mais jovens (Figura 8).

O acúmulo mínimo e máximo dos macronutrientes na parte aérea das plantas de eucalipto, obtidos com base nas populações da fronteira inferior (LFI) e da fronteira superior (LFS), aumentaram em função do ganho em volume de tronco (Tabela 6). Para um volume de tronco de 40 m<sup>3</sup>/ha, as plantas da LFS

acumularam, em média, 3,5; 2,8; 2,3; 2,0 e 1,6 vezes mais N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, que as plantas da LFI. Porém, para um volume de 600 m<sup>3</sup>/ha, essas proporções foram de 2,2; 3,5; 3,2; 6,9 e 5,6 vezes mais N, P, K, Ca e Mg, respectivamente. Nessas mesmas plantas da LFS, para um volume de tronco de 600 m<sup>3</sup>/ha, constata-se que elas acumularam a mais, 1275; 508 e 452 kg/ha de Ca, N e K, respectivamente, em comparação as plantas da LFI (Tabela 6), sendo estes os três nutrientes exigidos em maiores quantidades pelo eucalipto (MORAIS et al., 1990; SANTOS et al., 2017).

**Tabela 6.** Conteúdo de macronutrientes na parta aérea de plantas de eucalipto da fronteira inferior (LFI) e da fronteira superior (LFS), em função do volume de tronco

Volume de tronco	N		P		K		Ca		Mg	
	LFI	LFS	LFI	LFS	LFI	LFS	LFI	LFS	LFI	LFS
m <sup>3</sup> /ha	----- kg/ha -----									
40	23,8	84,7	2,1	6,0	12,8	29,0	15,4	30,7	6,0	9,9
60	37,4	114,3	2,5	7,7	16,3	51,4	16,1	82,8	5,5	26,1
80	51,0	143,8	3,0	9,5	20,1	73,7	17,2	135,0	5,2	42,4
100	64,6	173,4	3,5	11,3	24,1	96,1	18,8	187,1	5,2	58,6
120	78,2	202,9	4,0	13,0	28,4	118,4	20,9	239,2	5,4	74,9
140	91,7	232,5	4,5	14,8	32,9	140,8	23,5	291,4	5,9	91,1
160	105,3	262,0	5,0	16,5	37,6	163,1	26,5	343,5	6,6	107,4
180	118,9	291,6	5,5	18,3	42,6	185,5	30,1	395,6	7,6	123,6
200	132,5	321,2	6,0	20,0	47,8	207,8	34,1	447,8	8,8	139,9
220	146,1	350,7	6,5	21,8	53,2	230,2	38,6	499,9	10,2	156,1
240	159,7	380,3	7,0	23,5	58,9	252,6	43,6	552,0	11,8	172,4
260	173,3	409,8	7,5	25,3	64,9	274,9	49,0	604,2	13,7	188,7
280	186,8	439,4	8,0	27,1	71,0	297,3	55,0	656,3	15,9	204,9
300	200,4	468,9	8,5	28,8	77,4	319,6	61,4	708,4	18,3	221,2
320	214,0	498,5	9,0	30,6	84,1	342,0	68,3	760,6	20,9	237,4
340	227,6	528,0	9,5	32,3	91,0	364,3	75,7	812,7	23,8	253,7
360	241,2	557,6	10,0	34,1	98,1	386,7	83,5	864,8	26,9	269,9
380	254,8	587,1	10,5	35,8	105,5	409,0	91,9	917,0	30,2	286,2
400	268,4	616,7	11,0	37,6	113,1	431,4	100,7	969,1	33,8	302,4
420	281,9	646,2	11,5	39,3	121,0	453,7	110,0	1021,2	37,6	318,7
440	295,5	675,8	12,0	41,1	129,1	476,1	119,8	1073,3	41,7	334,9
460	309,1	705,4	12,5	42,9	137,4	498,4	130,0	1125,5	46,0	351,2
480	322,7	734,9	13,0	44,6	146,0	520,8	140,8	1177,6	50,6	367,4
500	336,3	764,5	13,5	46,4	154,8	543,2	152,0	1229,7	55,3	383,7
520	349,9	794,0	14,0	48,1	163,8	565,5	163,7	1281,9	60,4	400,0
540	363,5	823,6	14,5	49,9	173,1	587,9	175,8	1334,0	65,6	416,2
560	377,1	853,1	14,9	51,6	182,6	610,2	188,5	1386,1	71,1	432,5
580	390,6	882,7	15,4	53,4	192,4	632,6	201,6	1438,3	76,9	448,7
600	404,2	912,2	15,9	55,2	202,4	654,9	215,3	1490,4	82,9	465,0

LFI = linha de fronteira inferior; LFS = linha de fronteira superior.

As quantidades de nutrientes acumuladas na parte aérea das plantas de eucalipto das duas populações de fronteira (Figura 8; Tabela 6), dão uma ideia da exigência nutricional da cultura ao longo do ciclo de cultivo, podendo ser útil na definição das doses de fertilizantes e nas formas de parcelamento. Se tomarmos como exemplo o conteúdo máximo de K na parte aérea (LFS), para os menores volumes de tronco produzidos (Tabela 6), constata-se que as fertilizações com doses de 140 a 160 kg/ha de K<sub>2</sub>O, aplicadas nos dois primeiros anos em plantios comerciais de eucalipto (GONÇALVES et al., 2013; PINHEIRO et al., 2016), não estão compatíveis com a dinâmica de acúmulo do nutriente pelas plantas.

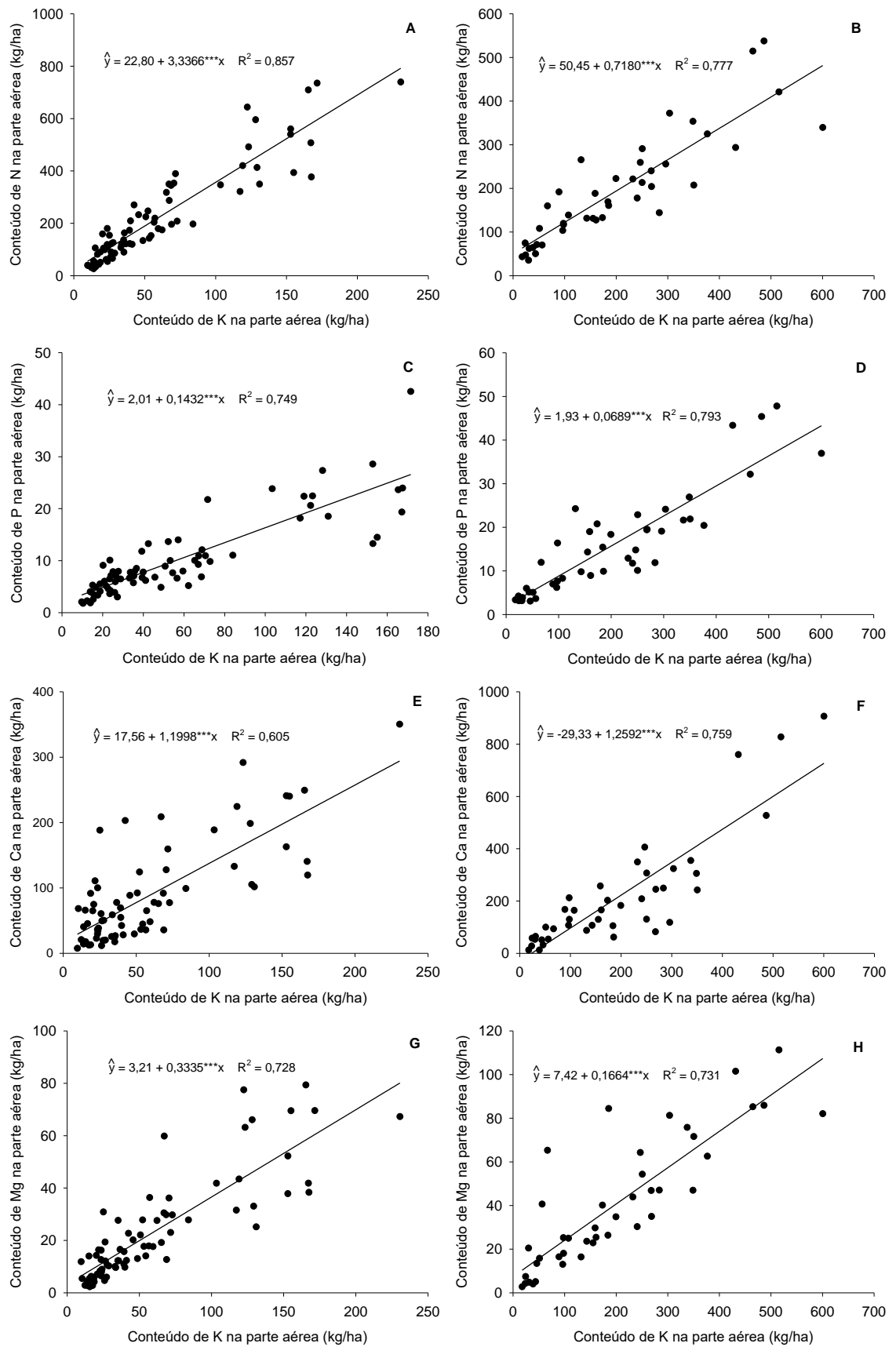
A sequência de acúmulo dos nutrientes na parte aérea das plantas de eucalipto foi variável com população de fronteira. Em geral, para as plantas da LFI a sequência foi N > K > Ca > Mg > P e para as plantas da LFS foi Ca > N > K > Mg > P (Tabela 6). Para *Eucalyptus grandis* com oito anos de idade, cultivados nas regiões de Viçosa e Paraopeba, MG, Morais et al. (1990) constaram que a sequência de acúmulo dos nutrientes na parte aérea foi N > Ca > K > Mg > P, sendo a mesma obtida para híbridos de *Eucalyptus spp.*, (FARIA et al., 2008). Em povoamentos de eucalipto com idade variando de seis meses a 11 anos, em 20 regiões de cinco Estados brasileiros Santana et al. (2008) constaram que, em média, a sequência de acúmulo dos nutrientes na parte aérea do eucalipto foi Ca > N > K > Mg > P, correspondendo a obtida nas plantas da LFS.

Pelas populações de fronteira, constata-se que nas plantas mais eficientes na utilização dos nutrientes (as da LFI), o Ca foi o terceiro nutriente mais acumulado na parte aérea (Tabela 6). Entretanto, nas plantas menos eficientes (as da LFS) o Ca foi o nutriente mais acumulado na parte aérea, o que requer uma atenção especial na prática da calagem, tendo em vista ser o nutriente mais exportado na colheita, quando a planta não é descascada no campo (SANTANA et al., 2008; GUIMARÃES et al., 2015). Esse maior conteúdo de Ca, frente aos demais nutrientes, deve-se ao fato dele ser absorvido em grandes quantidades e não apresentar translocação interna (ciclagem bioquímica) pelo eucalipto (LACLAU et al., 2003; TURNER; LAMBERT, 2008).

Por ser o K aplicado em grandes quantidades nos plantios de eucalipto, nas mesmas plantas selecionadas para compor a LFS e a LFI do relacionamento entre o volume de tronco e o conteúdo de K na parte aérea, foram obtidos

também os conteúdos de N, P, Ca e Mg. O conteúdo desses macronutrientes foi correlacionado com o conteúdo de K, buscando entender quais as implicações de uma fertilização potássica com doses elevadas sobre a absorção e acúmulo dos demais macronutrientes.

O conteúdo de N na parte aérea das plantas da LFI (Figura 9A) e das plantas da LFS (Figura 9B), correlacionou-se com o conteúdo de K na parte aérea das mesmas plantas de cada população. Com base nos coeficientes lineares das equações obtidas para cada fronteira (LFI = 3,3366 e LFS = 0,7180), constata-se que nas plantas que acumularam mais K na parte aérea, ou seja, aquelas localizadas na LFS, houve menor acúmulo de N e vice-versa. Pelo quociente entre essas declividades ( $3,3366/0,7180 = 4,6$ ), observa-se que as plantas da LFS têm 4,6 menos acumulação de N que nas plantas da LFI.



**Figura 9.** Relacionamento do conteúdo de N, P, Ca e Mg na parte aérea de plantas de eucalipto da fronteira inferior (A, C, E e G, respectivamente) e da fronteira superior (B, D, F e H, respectivamente) com o conteúdo de K na parte aérea das mesmas plantas.

Para um conteúdo de 204,2 kg/ha de K na parte aérea, as plantas da LFI (Figura 9A), acumularam 704,1 kg/ha de N e as plantas da LFS (Figura 9B) acumularam apenas 197,0 kg/ha de N. De acordo com Cantarella (2007), N e K apresentam interação do tipo não-competitiva e, quando são supridos de forma balanceada às plantas, frequentemente aumenta a resposta a ambos. Porém, quando um deles é fornecido em maiores quantidades e o solo é deficiente no outro, pode levar a decréscimos na resposta ao outro, tanto em produção quanto em acúmulo do nutriente. Isso ocorre em função da competição entre cátions que reduz a absorção de Ca e Mg (MARSCHNER, 2012) e conseqüentemente limita o crescimento.

De modo semelhante ao que ocorreu para N, os maiores conteúdos de P foram obtidos nas plantas que acumularam menos K na parte aérea (Figura 9). Esses resultados indicam que a absorção de K em grandes quantidades, comprometeu a absorção de P. Pelo quociente das declividades ( $0,1432/0,0689 = 2,07$ ), verificou-se que nas plantas localizadas na fronteira inferior (Figura 9C), o conteúdo de P foi aproximadamente duas vezes maior em relação às plantas da fronteira superior (Figura 9D).

O conteúdo de Ca na parte aérea das plantas de eucalipto da LFI (Figura 9E) e das plantas da LFS (Figura 9F) foi dependente da quantidade de K absorvida e acumulada e do volume de tronco produzido. Pelos coeficientes lineares das equações obtidas para cada fronteira (LFI = 1,1998 e LFS = 1,2592), pode-se concluir que as plantas da LFS, que acumularam maior quantidade de K na parte aérea para a produção de um determinado volume de tronco, não foram comprometidas quanto ao acúmulo de Ca.

Para um conteúdo de 215,8 kg/ha de K na parte aérea, as plantas de eucalipto da LFI acumularam 276,5 kg/ha de Ca (Figura 9E) e as plantas da LFS acumularam 242,4 kg/ha de Ca na parte aérea (Figura 9F). As relações entre os conteúdos de Ca e de K na parte aérea das plantas da LFI ( $Ca/K = 1,2$ ) e das plantas da LFS ( $Ca/K = 1,3$ ), indicam que a absorção de Ca não foi comprometida pela absorção de K em grandes quantidades. De acordo com Marschner (2012), cátions como o K podem atravessar a membrana plasmática com maior velocidade, deprimindo a absorção de cátions mais lentos como Ca e Mg, fato não evidenciado para o Ca neste trabalho.

Para o conteúdo de Mg na parte aérea das plantas o comportamento foi semelhante ao observado para os outros macronutrientes (N e P). Com base na

declividade das equações de correlação ( $LFI = 0,3335$  e  $LFS = 0,1664$ ), verifica-se que as plantas da LFS, ou seja, as que acumularam mais K (Figura 9H), têm 2,0 menos acumulação de Mg que as plantas da LFI (Figura 9G).

Essa diminuição no conteúdo de Mg nas plantas que absorveram muito K, está relacionado a inibição competitiva entre K e Mg no solo. Esses dois nutrientes competem pelo mesmo sítio ativo do carregador e quando o K está em maiores concentrações na solução, tem efeito depressivo na absorção de Mg (MALAVOLTA et al., 1997; MEURER, 2006).

As plantas que acumularam mais K na parte aérea, acumularam menos N, P e Mg (Figura 9). A soma total dos cátions absorvidos por determinada espécie vegetal, normalmente permanece relativamente pouco afetada pela variação na composição do meio na qual ela se desenvolve. Sendo assim, a diminuição na disponibilidade de determinado cátion resulta no aumento na absorção dos demais (ERNANI et al., 2007).

A absorção e acúmulo de K em grandes quantidades pelas plantas de eucalipto da LFS, evidencia um consumo de luxo do nutriente. Essa maior disponibilidade de K para as plantas da LFS não se traduziu em ganhos de produtividade, pois, o nutriente comprometeu a absorção de N, P e Mg que são essenciais ao crescimento das plantas. Esses resultados indicam que a aplicação de doses elevadas de K, realizadas em cobertura nos plantios de eucalipto, podem exercer papel negativo sobre aumento da produtividade, como constatado em alguns trabalhos (FARIA et al., 2002; GAZOLA et al., 2015; MELO et al., 2016). Deve-se também enfatizar que o parcelamento da fertilização potássica é tão importante quanto a dose a ser aplicada, entretanto as empresas aplicam dose única para reduzir os custos.

### **4.3. Obtenção de classes de fertilidade do solo para eucalipto**

A análise descritiva da produtividade do eucalipto, de alguns atributos químicos do solo e dos teores foliares de macronutrientes são apresentados na Tabela 7. O Incremento Médio Anual (IMA) dos talhões utilizados na obtenção dos relacionamentos, variou de muito baixo a valores superiores à média nacional que está em torno de  $35 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ . Os solos apresentaram teores de matéria orgânica variando de baixo a bom. O P disponível variou de muito baixo a muito bom, considerando que os solos das áreas de estudo, em geral,

possuem textura argilosa/muito argilosa. O K disponível variou de baixo a muito bom, o Ca trocável variou de muito baixo a bom e o Mg trocável, variou de muito baixo a médio (ALVAREZ V. et al., 1999).

**Tabela 7.** Resumo da estatística descritiva do Incremento Médio Anual (IMA), teor de matéria orgânica (MO) e macronutrientes no solo e do teor foliar de macronutrientes nas plantas de eucalipto

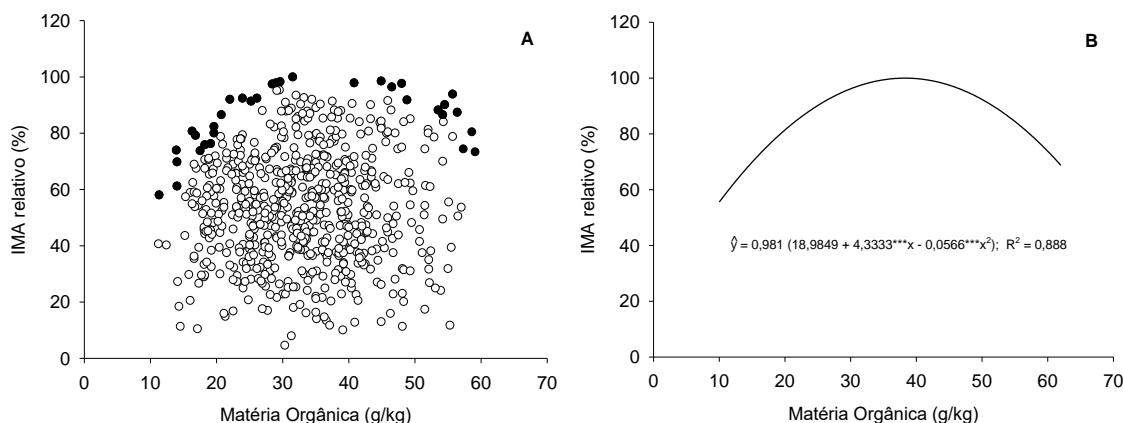
Variável	Mínimo	Máximo	Médio	DP	CV (%)
IMA (m <sup>3</sup> /ha/ano)	2,2	47,7	25,76	9,61	37,32
<b>Teor no solo</b>					
MO (g/kg)	11,20	57,00	32,90	9,64	29,31
P (mg/dm <sup>3</sup> )	1,21	21,47	8,56	3,75	43,79
K (mg/dm <sup>3</sup> )	8,80	227,35	85,09	40,89	48,06
Ca (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,03	3,00	0,51	0,47	91,42
Mg (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,01	0,80	0,25	0,16	62,85
<b>Teor nas folhas</b>					
N (g/kg)	12,30	31,40	19,15	2,76	14,42
P (g/kg)	0,43	4,65	1,04	0,28	26,67
K (g/kg)	2,50	29,47	8,07	3,04	37,70
Ca (g/kg)	0,78	10,90	4,36	1,56	35,76
Mg (g/kg)	0,31	3,86	1,93	0,61	31,66

DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

Quanto ao estado nutricional dos talhões usados nos relacionamentos, constata-se que os teores de N variaram da condição de tendendo a suficiente até a condição de tendendo a excesso. Os teores de P e K variaram de deficientes a excessivos (GALDINO, 2015). Os teores de Ca e Mg de deficientes a tendendo a excesso (FERNANDES, 2010). A maior variabilidade dos atributos químicos do solo foi observada para os teores de Ca e Mg. Para as características das plantas, a maior variabilidade foi apresentada pelo IMA e pelos teores foliares de K e Ca (Tabela 7).

O relacionamento da produtividade relativa (IMA relativo) de tronco de eucalipto com o teor de matéria orgânica do solo (MO) é apresentado na Figura 10. Na nuvem de pontos do relacionamento (Figura 10A), foram selecionados aqueles que se encontram na borda superior (destacados em preto) para o estabelecimento da linha de fronteira (LF) e posteriormente, com base nesses

pontos, foi ajustado um modelo de regressão polinomial de segundo grau para avaliar o efeito isolado do teor de MO sobre a produtividade do eucalipto (Figura 10B).



**Figura 10.** Diagrama de dispersão (A) e linha de fronteira (B) do relacionamento entre o IMA relativo do eucalipto e o teor de matéria orgânica do solo (0-20 cm).

A LF representa o efeito limitante de uma variável independente, compreendida nesse caso pelo teor de MO do solo, sobre uma variável dependente, representada pela produtividade relativa do eucalipto. Assim, assume-se que todos os talhões que apresentam valores de produtividade (IMA relativo) abaixo da LF, estão sendo influenciados por outra variável independente ou pela combinação de outras variáveis independentes (WEBB 1972; BLANCO-MACÍAS et al., 2010).

Para estabelecer as faixas de disponibilidade de MO no solo para as plantas de eucalipto (Tabela 8), a equação obtida pela abordagem da LF foi derivada e a primeira derivada igualada a zero ( $dy/dx = 0$ ). Pela derivada foram obtidos os valores de MO correspondentes ao nível crítico (90 % do IMA relativo) e da produtividade de máxima eficiência física (100 % do IMA relativo), bem como as demais classes.

**Tabela 8.** Classes de interpretação do teor de matéria orgânica (MO) no solo (0-20 cm) para o eucalipto

IMA relativo (%)	MO (g/kg) <sup>1/</sup>	Classes de Interpretação
< 70	< 15,25	Baixa
70 - 90	15,25 – 24,75	Média <sup>2/</sup>
90 - 100	24,75 – 38,28	Adequada
100 - 90	38,28 – 51,75	Alta
90 - 70	51,75 – 61,75	Muito Alta
< 70	> 61,75	Excessiva

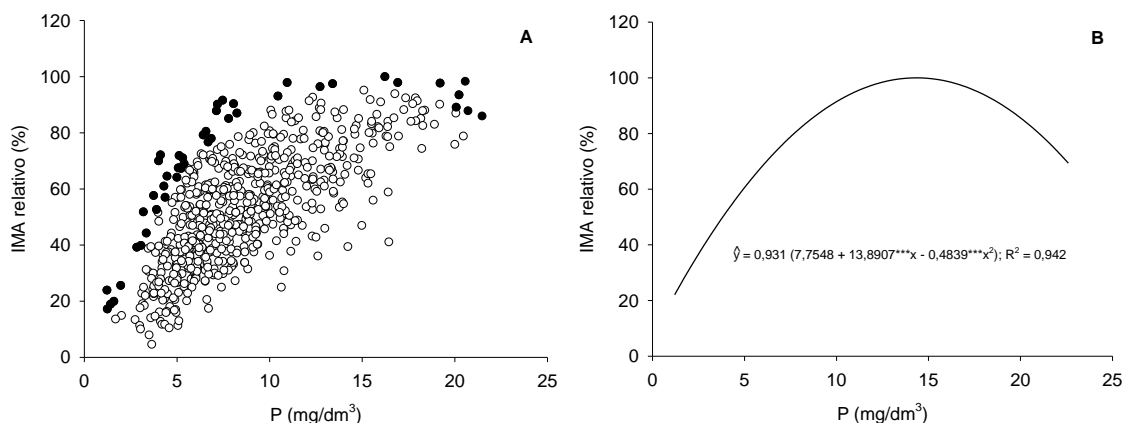
<sup>1/</sup> Método Walkley & Black; MO = 1,724 x CO. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Pelo método da LF foi estabelecido que a faixa ideal dos teores de MO no solo para obtenção da máxima produtividade de eucalipto, variou de 24,75 a 38,28 g/kg (Tabela 8). Esses valores estão dentro da faixa de 24,25 a 38,93 g/kg de MO obtida com base no trabalho de Gava (2005), avaliando as relações entre os atributos do solo e a produtividade de plantios de *Eucalyptus grandis*, com idades variando entre 6,5 e 7,0 anos. Esses teores estão dentro da faixa de 21 a 40 g/kg, classificados como médios pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG (ALVAREZ V. et al., 1999).

A matéria orgânica do solo (MO) sob plantações florestais tem grande importância no fornecimento de nutrientes às plantas, apresentando boa correlação com a disponibilidade de N e com a produtividade (GONÇALVES et al., 2013; PULITO et al., 2015). Devido a essa boa correlação com os teores de N, Gonçalves et al. (2008) propuseram as classes de resposta esperadas e a recomendação de adubação nitrogenada em plantios de eucalipto usando o teor de MO como referência. De acordo com esses autores, solos com teores de MO abaixo de 20, entre 21 e 50 e maior que 50 g/kg, respectivamente, apresentam alta, moderada e ausência de resposta a adubação nitrogenada.

O diagrama de dispersão que mostra a relação entre o IMA relativo (produtividade) do eucalipto e o teor de P disponível no solo (0-20 cm), é apresentado na Figura 11. A curva de resposta obtida pelo método da LF, indica que a produtividade de tronco de eucalipto (IMA relativo) aumentou ao longo da faixa de teores de P disponível no solo, atingindo um platô a partir do qual não se observa mais incrementos mesmo com aumento do teor do nutriente no solo (Figura 11A; Figura 11B). A LF pode ser interpretada em termos da Lei do

Mínimo de Liebig, que estabelece que a produtividade é determinada pelo fator que se encontra em quantidade mínima, e que essa produtividade irá variar com mudanças nesse atributo até que o mesmo deixe de ser limitante (SHATAR; McBRATNEY, 2004).



**Figura 11.** Diagrama de dispersão (A) e linha de fronteira (B) do relacionamento entre o IMA relativo do eucalipto e o teor de P disponível do solo (0-20 cm).

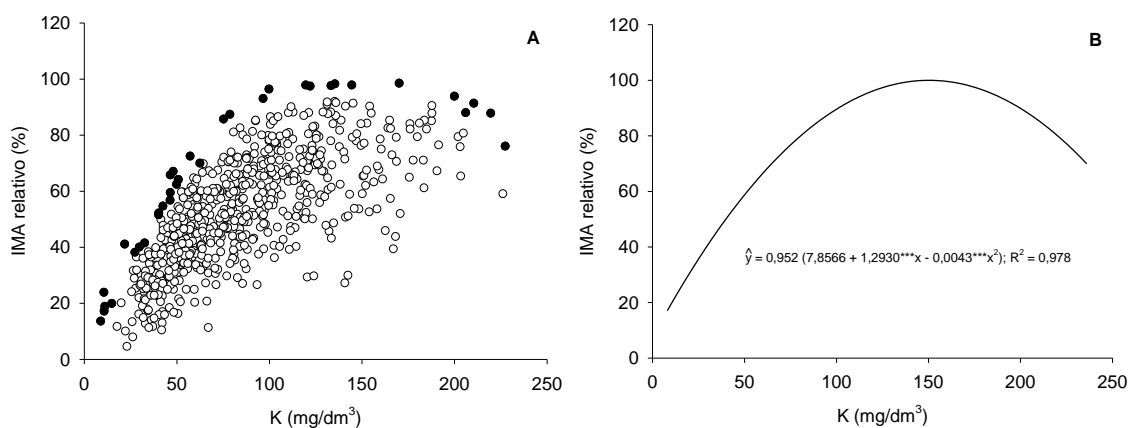
A partir do relacionamento do IMA relativo (produtividade relativa) do eucalipto com os teores de P no solo e do uso da abordagem da LF, foram obtidas as equações de regressão usadas para definir o nível crítico (90 % do IMA relativo), que corresponde ao limite superior da classe Média, e as faixas de disponibilidade do nutriente no solo para esta espécie florestal (Tabela 9). Pelo método da LF, constata-se que a máxima produtividade foi obtida com teores de P no solo, variando de 9,70 a 14,35 mg/dm³. Levando em consideração que o máximo IMA desses talhões é de 47,7 m³/ha/ano (Tabela 7) e que os mesmos, em geral, apresentam solos argilosos/muito argilosos, esse valor de nível crítico de manutenção é superior aos 4,5 mg/dm³ definido para a cultura do eucalipto, considerando um IMA de 50 m³/ha/ano (NOVAIS et al., 1986) e que não houve atualização até hoje (BARROS et al., 2014). Entretanto, deve-se destacar que o nível crítico (9,70 mg/dm³) obtido nesse trabalho está entre 8,0 e 12,0 mg/dm³ estabelecido para solos argilosos/muito argilosos no Estado de Minas Gerais (ALVAREZ V. et al., 1999).

**Tabela 9.** Classes de interpretação do teor de P disponível no solo (0-20 cm) para o eucalipto

IMA relativo (%)	P (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>1/</sup>	Classes de Interpretação
< 70	< 6,10	Baixa
70 - 90	6,10 – 9,70	Média <sup>2/</sup>
90 - 100	9,70 – 14,35	Adequada
100 - 90	14,35 – 19,10	Alta
90 - 70	19,10 – 22,50	Muito Alta
< 70	> 22,5	Excessiva

<sup>1/</sup> Extrator Mehlich-1. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Os gráficos de dispersão e da equação da linha de fronteira, relacionando o IMA relativo do eucalipto com o teor de K disponível no solo (0-20 cm) são apresentados na Figura 12. Pela dispersão dos pontos, que representam o teor de K disponível em cada talhão, constata-se que a maioria deles está abaixo da LF e que os teores desse nutriente no solo são agrupados em um intervalo muito amplo, indicando grande variabilidade no solo das áreas estudadas quanto a disponibilidade de K (Figura 12A). Pela curva de resposta é possível observar que a produtividade é muito mais afetada pela deficiência do que pelo excesso de K. Esses pontos (talhões) localizados ao longo da LF, representam casos em que os fatores que influenciam a produtividade têm valores ótimos e o rendimento é influenciado apenas pelo teor de K. Aqueles localizados abaixo da LF, indicam que um ou mais fatores determinantes da produtividade, não foram otimizados e o nível de produção não dependeu apenas da nutrição potássica (IZSÁKI 2017).



**Figura 12.** Diagrama de dispersão (A) e linha de fronteira (B) do relacionamento entre o IMA relativo do eucalipto e o teor de K disponível do solo (0-20 cm).

Pelo método da LF do relacionamento entre IMA relativo do eucalipto e o teor de K disponível no solo (0-20 cm), observa-se que a produtividade foi maximizada em uma faixa ampla, entre os teores de 100,0 a 150,35 mg/dm<sup>3</sup> de K (Tabela 10). Fora desta faixa, o rendimento do eucalipto foi comprometido em resposta a mudanças no teor de K do solo. O valor de nível crítico (90 % do IMA relativo), que compreende o limite superior da classe Média, está próximo aos 90 mg/dm<sup>3</sup> de K proposto por Novais et al. (1986) para um IMA de 50 m<sup>3</sup>/ha/ano.

**Tabela 10.** Classes de interpretação do teor de K disponível no solo (0-20 cm) para o eucalipto

IMA relativo (%)	K (mg/dm <sup>3</sup> ) <sup>1/</sup>	Classes de Interpretação
< 70	< 65,0	Baixa
70 - 90	65,0 – 100,0	Média <sup>2/</sup>
90 - 100	100,0 – 150,35	Adequada
100 - 90	150,35 – 199,0	Alta
90 - 70	199,0 – 235,0	Muito Alta
< 70	> 235,0	Excessiva

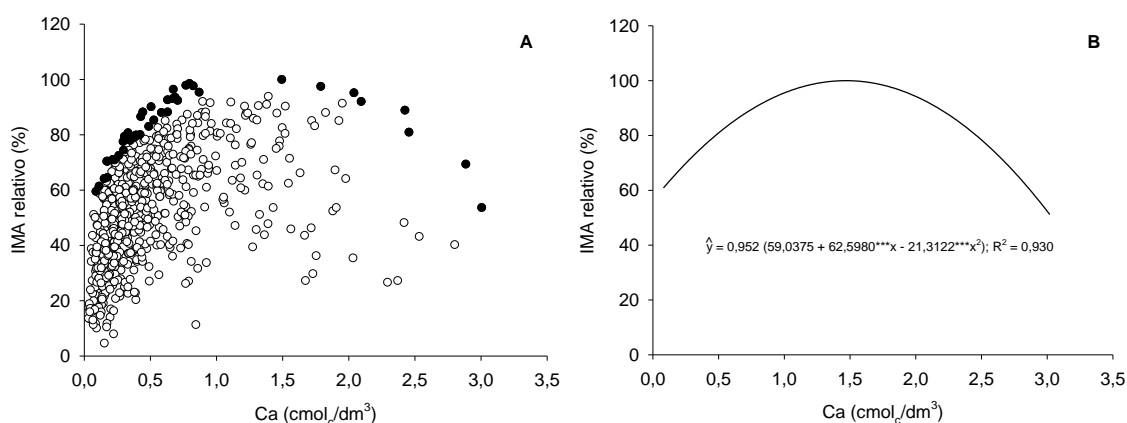
<sup>1/</sup> Extrator Mehlich-1. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

O aumento da disponibilidade de K no solo acima da faixa considerada adequada para o melhor desenvolvimento da cultura, proporcionou declínios na produtividade do eucalipto (Tabela 10). Reduções de produtividade de eucalipto, em função de maior disponibilidade de K no solo, foram observadas também por Gazola et al. (2015). Esses autores constataram que maiores doses de K no solo promoveram aumento no teor foliar do nutriente e reduziram os teores de Ca e Mg o que está de acordo com Malavolta et al. (1997) e Marschner (2012) ao afirmarem que o K em teores elevados no solo compromete a absorção de Ca e Mg e consequentemente a produtividade.

A utilização da informação da Tabela 10 para recomendação de adubação será feita da seguinte maneira. A dose recomendada (DR) do nutriente é obtida pela diferença entre nível crítico (NC) do nutriente para a cultura (Tabela 10) e o teor do nutriente disponível no solo (NUTdisp), levando em consideração a taxa de recuperação do nutriente pelo extrator (TRext), usando a fórmula  $DR = [(NC - NUTdisp)/TRext] \times 2$ . Dessa forma, considerando um teor de K no solo de 70

mg/dm<sup>3</sup> e uma taxa de recuperação do extrator de 80 %, a dose recomendada para o eucalipto será de 75 kg/ha de K, ou seja,  $DR = [(100 - 70)/0,8] \times 2$ .

A curva de reposição do IMA relativo (produtividade) do eucalipto em função do teor de Ca no solo é apresentada na Figura 13. Com base na distribuição do conjunto de dados no gráfico de dispersão, constata-se que a maioria dos talhões apresentam teores de Ca menores que 1,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> (Figura 13A). A LF do relacionamento indica que houve uma resposta positiva ao aumento do teor de Ca no solo sobre a produtividade, porém, após atingir um valor ótimo, a afetou de forma negativa (Figura 13B). As LF podem revelar rendimentos máximos potenciais para uma determinada cultura em um determinado ambiente. Estes, podem por vezes, representar os rendimentos máximos obtidos sob condições de manejo ou o rendimento localmente atingível (TITTONELL; GILLER, 2013).



**Figura 13.** Diagrama de dispersão (A) e linha de fronteira (B) do relacionamento entre o IMA relativo do eucalipto e o teor de Ca trocável do solo (0-20 cm).

As faixas de disponibilidade de Ca no solo, obtidas com base na equação da LF, são apresentadas na Tabela 11. Derivando a equação da LF e igualando a zero, foi obtido o teor de Ca no solo que maximiza o IMA relativo (1,47 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>). Posteriormente o IMA relativo, obtido com esse teor de Ca no solo, foi multiplicado por 0,9 para obter o teor do nutriente no solo correspondente ao nível crítico (0,77 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>). Esse valor de nível crítico obtido pelo método da LF para um IMA de 47,7 m<sup>3</sup>/ha/ano, está próximo aos 0,80 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> proposto por Novais et al. (1986) para uma produtividade esperada de 50,0 m<sup>3</sup>/ha/ano.

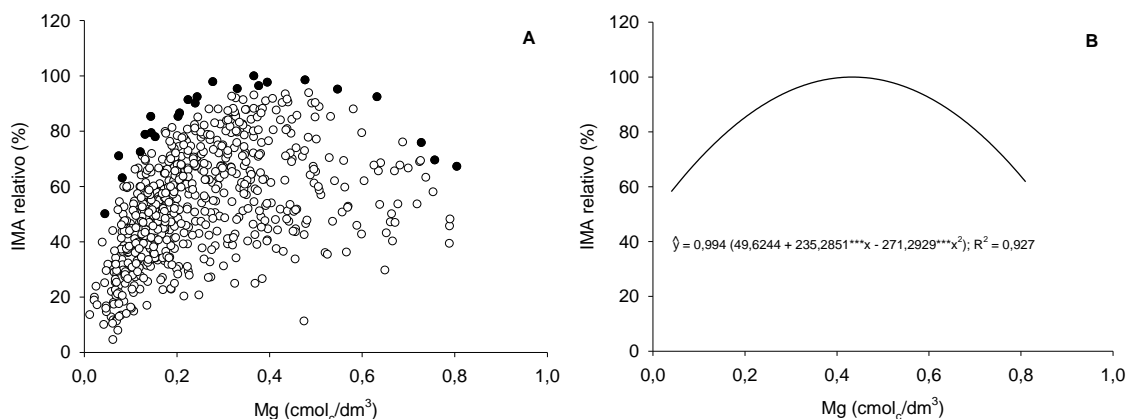
**Tabela 11.** Classes de interpretação do teor de Ca trocável no solo (0-20 cm) para o eucalipto

IMA relativo (%)	Ca (cmol <sub>d</sub> /dm <sup>3</sup> ) <sup>1/</sup>	Classes de Interpretação
< 70	< 0,25	Baixa
70 - 90	0,25 – 0,77	Média <sup>2/</sup>
90 - 100	0,77 – 1,47	Adequada
100 - 90	1,47 – 2,17	Alta
90 - 70	2,17 – 2,69	Muito Alta
< 70	> 2,69	Excessiva

<sup>1/</sup> Extrator KCl 1 mol/L. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

Quando os teores de Ca no solo estavam acima de 1,47 cmol<sub>d</sub>/dm<sup>3</sup>, observa-se que a produtividade do eucalipto foi comprometida (Tabela 11). Teores elevados de Ca no solo diminuem os teores de K e Mg, devido ao antagonismo entre o Ca, K e Mg pelos mesmos locais de troca catiônica, fato constatado por Chatzistathis et al. (2015). Esses autores constataram que a elevação dos teores de Ca no solo, devido a aplicação de calcário (de natureza calcítica), também reduziu os teores de Cu, Mn e Fe no solo e nas folhas, elementos essenciais ao crescimento das plantas.

O relacionamento da produtividade relativa (IMA relativo) de tronco de eucalipto com o teor de Mg trocável, apresenta uma elevada dispersão dos pontos em função da disponibilidade do nutriente no solo (Figura 14A). A equação polinomial de segundo grau da LF, indica que o aumento do teor de Mg no solo inicialmente proporcionou uma resposta positiva com aumentos da produtividade (Figura 14B). Entretanto, teores mais elevados do nutriente no solo, proporcionaram redução no crescimento indicando que nessa condição outros fatores também estariam limitando a produtividade. Segundo Walworth et al. (1986) a vantagem da curva polinomial quadrática de segundo grau, derivada do método da LF é que ela pode ser usada para isolar a influência de um único fator de produção a partir de dados em que a produtividade foi afetada por múltiplos fatores (WEBB, 1972).



**Figura 14.** Diagrama de dispersão (A) e linha de fronteira (B) do relacionamento entre o IMA relativo do eucalipto e o teor de Mg trocável do solo (0-20 cm).

A partir das equações de regressão ajustadas pelo método da LF (Figura 14B), foram calculadas as faixas de disponibilidade de Mg no solo e o teor do nutriente que proporcionou a máxima eficiência econômica ou nível crítico (90 % do IMA relativo) e a máxima eficiência física ou nível ótimo (100 % do IMA relativo), que corresponderam a 0,25 e 0,43 cmol/dm<sup>3</sup>, respectivamente (Tabela 12). Esse nível crítico é superior aos 0,19 cmol/dm<sup>3</sup> sugerido como ideal a obtenção de produtividades de 50 m<sup>3</sup>/ha/ano em plantios de eucalipto (NOVAIS et al., 1986).

**Tabela 12.** Classes de interpretação do teor de Mg trocável no solo (0-20 cm) para o eucalipto

IMA relativo (%)	Mg (cmol/dm <sup>3</sup> ) <sup>1/</sup>	Classes de Interpretação
< 70	< 0,10	Baixa
70 - 90	0,10 – 0,25	Média <sup>2/</sup>
90 - 100	0,25 – 0,43	Adequada
100 - 90	0,43 – 0,62	Alta
90 - 70	0,62 – 0,76	Muito Alta
< 70	> 0,76	Excessiva

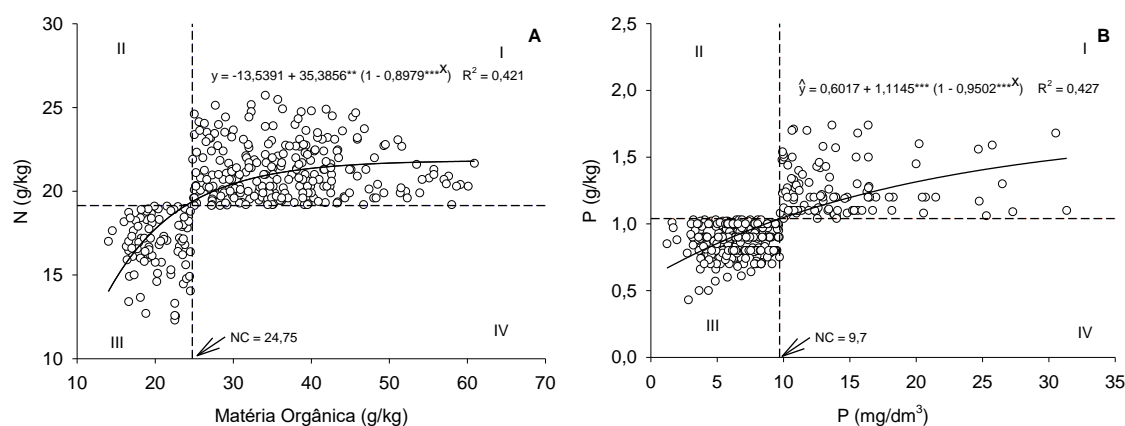
<sup>1/</sup> Extrator KCl 1 mol/L. <sup>2/</sup> O limite superior desta classe indica o nível crítico.

A base de dados usada nesse trabalho permitiu relacionar os teores de MO, P, K, Ca e Mg no solo com o IMA relativo (produtividade relativa) do eucalipto usando o método da LF (Figura 10 a Figura 14). Esses relacionamentos foram obtidos através do ajuste de equações de regressão polinomiais de

segundo grau, altamente significativas ( $p < 0,0001$ ) e com elevados valores de  $R^2$  (0,88 a 0,97), indicando que o método da linha de fronteira pode ser usado para determinar faixas de disponibilidade de atributos químicos do solo, como evidenciado em outros trabalhos (EVANYLO; SUMNER, 1987; SCHNUG et al., 1996; BHAT et al., 2012; SOUSA et al., 2018).

#### 4.4. Obtenção de faixas de suficiência foliar para eucalipto

Os teores foliares de N e P nas plantas de eucalipto, responderam de forma crescente ao aumento dos teores de MO e de P disponível no solo. Para os teores de N no tecido foliar, há uma tendência de estabilização a partir do teor de 40 g/kg de MO no solo (Figura 15A). De acordo com Barreto et al. (2010) o N mineralizável a partir da MO do solo em plantios de eucalipto é a principal fonte do nutriente para as plantas, o que justifica a relação entre o teor de N foliar e o teor de MO no solo. Entretanto, a mineralização da MO e a disponibilidade de N para as plantas é fortemente afetada pelas condições climáticas e pela textura do solo (PULITO et al., 2015) e dessa forma, esse relacionamento pode nem sempre ocorrer.



**Figura 15.** Relacionamento entre os teores de N (A) e P (B) em folhas de eucalipto em função dos teores de MO e P no solo (0-20 cm), obtido pelo método Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps)

Para os teores foliares de P a tendência de estabilização pela maior disponibilidade do nutriente no solo foi menos acentuada (Figura 15B), indicando que plantas cultivadas em solos com teores elevados do nutriente, ou supridos pela fertilização, devem apresentar teores elevados de P no tecido foliar, mesmo que esse não se traduza em maior produtividade. Esses resultados estão de

acordo com Melo et al. (2016) que observaram que a fertilização fosfatada proporcionou aumento no teor foliar de P de plantas de eucalipto.

Para estimar a faixa de suficiência foliar de N, o nível crítico e ótimo (24,75 e 38,28 g/kg) de MO no solo foram substituídos na equação do DQRps (Figura 15A) e obteve-se a faixa de 19,4 a 21,3 g/kg de N como ideal. Esses teores estão próximos aos estimados por Malavolta et al. (1997) para plantios de *Eucalyptus grandis* e dentro da faixa estabelecida por Bellote e Silva (2000) e por Galdino (2015) para plantios de *Eucalyptus* no Brasil, porém, abaixo da faixa sugerida por Gonçalves (2011) para as espécies de eucalipto mais plantadas no país (Tabela 13).

**Tabela 13.** Faixas de teores foliares de macronutrientes adequadas para o eucalipto

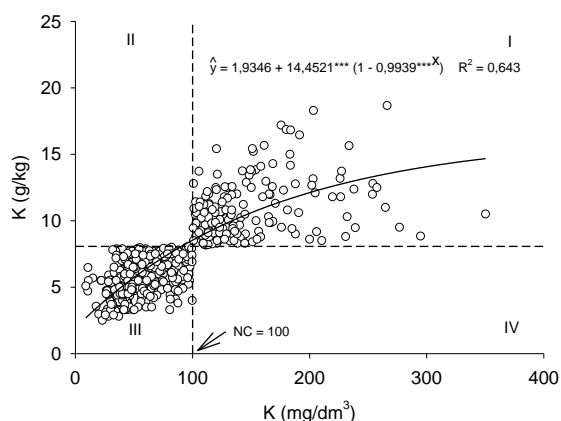
Elemento	Autores			
	Malavolta et al. (1997) <sup>1/</sup>	Bellote; Silva (2000) <sup>2/</sup>	Gonçalves (2011) <sup>3/</sup>	Galdino (2015) <sup>4/</sup> ; Fernandes (2010) <sup>5/</sup>
N (g/kg)	21-23	20-22	21-30	14,8-20,9
P (g/kg)	1,3-1,4	0,9-1,4	1,0-1,3	0,82-1,22
K (g/kg)	9-10	7,5-8,3	5,5-8,5	5,6-8,8
Ca (g/kg)	5-6	3,8-6,0	3,5-6,0	3,68-5,9
Mg (g/kg)	2,5-3,0	2,6-6,2	2,0-3,0	1,39-2,57

<sup>1/</sup> Plantios de *Eucalyptus grandis* de alta produtividade; <sup>2/</sup> Plantios de *Eucalyptus* em geral; <sup>3/</sup> Espécies de *Eucalyptus* mais plantadas no Brasil; <sup>4/</sup> N, P, K <sup>5/</sup> Ca e Mg em plantios de *Eucalyptus* no Brasil obtidos pela linha de fronteira.

Pela equação do DQRps (Figura 15B) e usando os teores críticos e ótimos de P no solo (9,7 e 14,35 mg/dm<sup>3</sup>) foi obtida a faixa adequada dos teores foliares de P em plantas de *Eucalyptus grandis*, que variou de 1,0 a 1,2 g/kg de P. Essa faixa corrobora as obtidas por Bellote e Silva (2000), Gonçalves (2011) e Galdino (2015), entretanto, está abaixo da sugerida por Malavolta et al. (1997) para plantas de alta produtividade (Tabela 13).

O teor foliar de K foi diretamente relacionado com o teor do nutriente no solo (Figura 16). A curva de resposta, ajustada aos dados dos quadrantes III e I por um modelo exponencial, indica que a maior disponibilidade de K no solo se traduziu, dentro de certos limites, em maiores teores do nutriente nas folhas do eucalipto, obedecendo a uma das premissas básicas para que a diagnose foliar possa ser usada (MALAVOLTA et al., 1997). Relação positiva entre o teor foliar e teor no solo foi observada também por Almeida et al. (2010), Silva et al. (2013) e Gazola et al. (2015) ao constatarem que o aumento das doses de K aplicadas

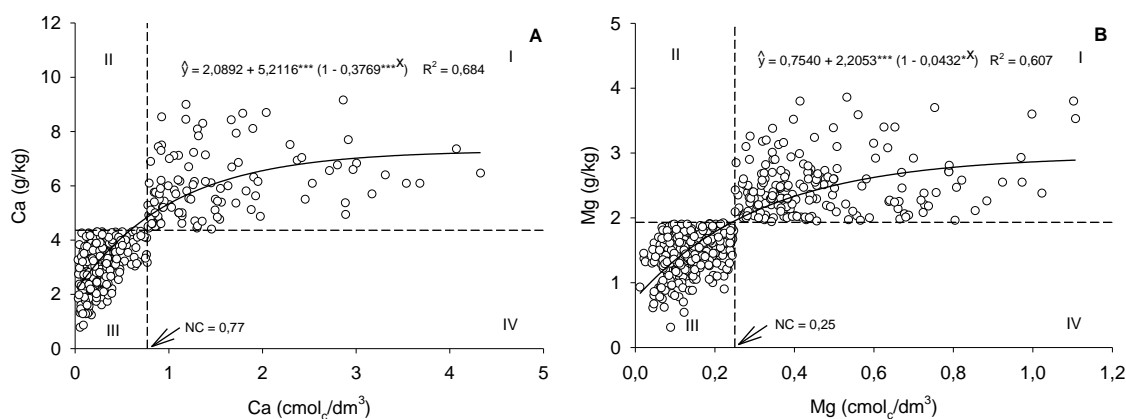
ao solo, proporcionaram aumento nos teores foliares de K em plantas de *Eucalyptus*.



**Figura 16.** Relacionamento entre os teores de K em folhas de eucalipto em função dos teores de K do solo (0-20 cm), obtido pelo método do Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps)

A faixa de teores adequados de K no tecido foliar das plantas de eucalipto, obtida com base na equação do DQRps (Figura 16) e nos níveis críticos e ótimos de K no solo ( $100$  e  $150,35$   $\text{mg/dm}^3$ ) foi de  $8,5$  e  $10,6$   $\text{g/kg}$  de K. Esses teores são superiores aos estabelecidos por Bellote e Silva (2000), Gonçalves (2011) e Galdino (2015) e estão próximos aos sugeridos como adequados por Malavolta et al. (1997) para plantios de *Eucalyptus grandis* (Tabela 13). As diferenças observadas entre as faixas propostas nesse trabalho e a de outros autores pode ser atribuída aos diferentes métodos de cálculo utilizados (LF e DQRps), a área de abrangência dos plantios, as espécies de *Eucalyptus* usadas na determinação das normas e as condições edafoclimáticas dos diferentes locais.

Os teores de Ca e Mg nas folhas de eucalipto apresentaram uma relação positiva com os teores de Ca e Mg trocáveis no solo (Figura 17). O ajuste das curvas aos pontos dos quadrantes III e I por um modelo exponencial, semelhante ao comportamento da Lei de Mitscherlich ou lei dos incrementos decrescentes, mostra que os teores foliares de Ca e Mg tendem a atingir um platô e apresentam pequenos incrementos com teores no solo maiores que  $2,5$  e  $0,6$   $\text{cmol/dm}^3$  de Ca e Mg, respectivamente (Figuras 17A e 17B). Tais resultados corroboram os obtidos por Simonete et al. (2013) ao constatarem que a calagem (calcário calcítico) promoveu aumento dos teores de Ca e Mg no solo e no tecido foliar de plantas de *Eucalyptus saligna*.



**Figura 17.** Relacionamento entre os teores de Ca (A) e Mg (B) em folhas de eucalipto em função dos teores de Ca e Mg no solo (0-20 cm), obtido pelo método Diagrama de Quadrantes do Relacionamento planta-solo (DQRps)

Para obter as faixas de suficiência foliar de Ca e Mg, foram usadas as equações estabelecidas pelo método do DQRps (Figuras 17A e 17B). Usando os níveis críticos e ótimos de Ca e Mg no solo (Ca = 0,77 e 1,47, Mg = 0,25 e 0,43 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) e substituindo nas equações, foram encontradas as faixas de 4,8 a 6,1 g/kg para Ca e de 1,9 a 2,4 g/kg para Mg, como ideias para o *Eucalyptus grandis*. Essas faixas para Ca estão de acordo com as obtidas na literatura para a cultura do eucalipto por vários autores (Tabela 13). No caso do Mg os teores obtidos nesse trabalho estão dentro apenas da faixa proposta por Fernandes (2010) e abaixo da proposta pelos demais autores (Tabela 13).

## 5. CONCLUSÕES

Os valores de coeficiente de partição ( $K_d$ ) de potássio foram (L/kg): RU-SF = 4,71, LVA-VII = 7,89, LV-BII = 9,65, LV-BO = 11,25, LV-CO = 13,74, LVA-BV = 8,93 e LVA-BA = 8,38.

Os valores de  $K_d$  foram influenciados pelo teor de argila, teor de matéria orgânica, CTC, fósforo remanescente, equivalente de umidade e densidade do solo.

Os teores de K no solo necessários para que as plantas de eucalipto na fase inicial de crescimento iniciem a absorção e atinjam 98 % do  $I_{max}$  são ( $mg/dm^3$ ): RU-SF = 1,1 e 38,0; LVA-BA = 1,8 e 59,9; LVA-VII = 1,7 e 56,9; LVA-BV = 1,8 e 60,2; LV-BII = 1,9 e 65,1; LV-BO = 2,4 e 80,3; LV-CO = 2,5 e 82,5.

A absorção de K em grandes quantidades pelas plantas de eucalipto reduziu a absorção de N, P, Mg e não comprometeu a absorção de Ca.

A faixa adequada de atributos químicos do solo obtida pelo método da linha de fronteira foi de 24,75-38,28 g/kg de MO; 9,7-14,35  $mg/dm^3$  de P; 100,0-150,35  $mg/dm^3$  de K; 0,77-1,47  $cmol_c/dm^3$  de Ca; e 0,25-0,43  $cmol_c/dm^3$  de Mg.

A faixa ideal de teores foliares para eucalipto, obtidas pelo método do DQRps é de 19,4-21,3 g/kg de N; 1,0-1,2 g/kg de P; 8,5-10,6 g/kg de K; 4,8-6,1 g/kg de Ca; e 1,9-2,4 g/kg de Mg.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBAUGH, T. J.; RUBILAR, R. A.; FOX, T. R.; ALLEN, H. L.; URREGO, J. B.; ZAPATA, M.; STAPE, J. L. Response of *Eucalyptus grandis* in Colombia to mid-rotation fertilization is dependent on site and rate but not frequency of application. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 350, p. 30-39, 2015.

ALCÂNTARA, F. A.; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; RESENDE, Á. V. Extraction methods for phosphorus and their relationship with soils phosphorus-buffer capacity estimated by the remaining-phosphorus methodology-a pot study with maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 3-4, p. 603-615, 2008.

ALI, A. M. Nutrient sufficiency ranges in mango using Boundary-Line approach and Compositional Nutrient Diagnosis Norms in El-Salhiya, Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 49, n. 2, p. 188-201, 2018.

ALMEIDA, J. C. R.; LACLAU, J. P.; GONÇALVES, J. L. M.; RANGER, J.; SAINT-ANDRÉ, L. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1786-1795, 2010.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ANGHINONI, I.; VOLKART, C. R.; FATTORE, N.; ERNANI, P. R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 3, p. 355-361, 1989.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, F. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010.

BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. Nutrição e adubação mineral do eucalipto. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Eds.). **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: SIF, 2014. p. 187-208.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; TEIXEIRA, J. L.; FERNANDES FILHO, E. I. NUTRICALC 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**, Valdivia, v. 16, n. 1, p. 129-131, 1995.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J. P.; DOMEQ, J. C.; CHRISTINA, M.; BOUILLET, J. P.; PICCOLO, M. C.; GONÇALVES, J. L. M.; MOREIRA, R M.; KRUSCHE, A. V.; BOUVET, J. M.; NOUVELLO, Y. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, Cambridge, v. 203, n. 2, p. 401-413, 2014.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p.105-133.

BHAT, R.; SUJATHA, S. Establishing leaf nutrient norms for arecanut by boundary line approach. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, n. 6, p. 849-862, 2013.

BHAT, R.; SUJATHA, S.; JOSE, C. T. Assessing soil fertility of a laterite soil in relation to yield of arecanut (*Areca catechu* L.) in humid tropics of India. **Geoderma**, Amsterdam, v. 189-190, p. 91-97, 2012.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 405, p. 271-283, 2017.

BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J. A.; MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 173, n 6, p. 927-934, 2010.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, n. 113, p. 73-85, 1974.

BRAZ, A. M. S.; FERNANDES, A. R.; FERREIRA, J. R.; ALLEONI, L. R. F. Prediction of the distribution coefficients of metals in Amazonian soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 95, p. 212-220, 2013.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

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

CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S.A. - CENIBRA. **Relatório do levantamento semidetalhado de solos da Cenibra**: Fase 2. Belo Oriente: Cenibra, 2001. v.1. 101 p.

CHATZISTATHIS, T.; ALIFRAGIS, D.; PAPAIOANNOU, A. The influence of liming on soil chemical properties and on the alleviation of manganese and copper toxicity in *Juglans regia*, *Robinia pseudoacacia*, *Eucalyptus* sp. and *Populus* sp. plantations. **Journal of Environmental Management**, London, v.150, p. 149-156, 2015.

CHAVES, L. H. G.; KINJO, T. Relação Quantidade/Intensidade de potássio em solos do trópico semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 3, p. 257-261, 1987.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and influx into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 54, n. 4, p. 564-568, 1974.

COMETTI, N. N.; FURLANI, P. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Soluções nutritivas: Formulações e aplicações. In: FERNANDES, M. S. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 89-114.

DEUS, J. A. L.; SOARES, I.; NEVES, J. C. L.; MEDEIROS, J. F. M.; MIRANDA, F. R. Fertilizer recommendation system for melon based on nutritional balance. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 498-511, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F.C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 551-594.

EVANYLO, G. K.; SUMNER, M. E. Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 18, n. 12, p. 1379-1401, 1987.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba. I -

Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 623-632, 2009.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LIMA, J. C.; TEIXEIRA, J. L. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 577-584, 2002.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; CUNHA, V. L. P.; MARTINS, I. S.; MARTINS, R. C. C. 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, 2008.

FERMONT, A. M., VAN ASTEN, P. J. A., TITTONELL, P., VAN WIJK, M. T., GILLER, K. E. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.112, p. 24-36, 2009.

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

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 115-152.

FONTES, M. P. F.; ALLEONI, L. R. F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 6, p. 589-608, 2006.

FURTINI NETO, A. E. **Eficiência nutricional, cinética de absorção e frações fosfatadas em *Eucalyptus ssp.*** 1994. 99 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

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

GALDINO, M. P. **Valores de referência e faixas de suficiência para avaliação do estado nutricional da cultura do eucalipto no Brasil**. 2015. 51 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; VILLANI, E. M. A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 895-905, 2011.

GAVA, J. L. **Relações entre os atributos do solo e a qualidade da madeira de clone de *Eucalyptus grandis* para produção de celulose**. 2005, 54 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

GAZOLA, R. N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; DINALLI, R. P.; MORAES, M. L. T.; CELESTRINO, T. D. S.; SILVA, P. H. M.; DUPAS, E. Doses of N, P and K in the cultivation of eucalyptus in soil originally under Cerrado vegetation. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 3, supl, p. 1895-1912, 2015.

GIANELLO, C.; MIELNICZUK, J. Características físicas e químicas de solo que afetam a absorção de potássio por plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, n. 2, p. 109-114, 1981.

GUIMARÃES, C. C.; SCHUMACHER, M. V.; WITSHORECK, R.; SOUZA, H. P.; SANTO, J. C. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.5, p.873-882, 2015.

GONÇALVES, J. L. M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: GONÇALVES, J. L. M.; PULITO, A. P.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SILVA, L. D. (Eds.). II Encontro Brasileiro de Silvicultura, 2011. Campinas. **Anais...** Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF, 2011, p. 85-113.

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

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

GRESPLAN, S. L.; DIAS, L. E.; NOVAIS, R. F. Crescimento e parâmetros cinéticos de absorção de amônio e nitrato por mudas de *Eucalyptus* spp submetidas a diferentes relações amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 667-674, 1998.

HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 77-85, 2006.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2017**. Brasília, 2017. 80 p. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2017.

IZSÁKI, Z. Effect of potassium supplies on the nutritional status of maize (*Zea mays* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 48, n. 19, p. 2347-2358, 2017.

LACLAU, J.P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 7, p. 879-892, 2003.

LEITE, F. P.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 821-831, 2010.

LIMA, A. M. N.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R.; LEITE, F. P. 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, 2005.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 1-64.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1733-1744, 2012.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C. Boundary line model to estimate the nutrient sufficiency range in muskmelon leaves. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0160033, 2016.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafós, 1997. 319 p.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. London: Elsevier, 2012. 643p.

MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. V. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, Basileia, v. 7, n. 1, p. 2, 2016.

MENDES, H. S. J.; PAULA, N. F.; SCARPINATTI, E. A.; PAULA, R. C. Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 603-611, 2013.

MENEGALE, M. L. C.; ROCHA, J. H. T.; HARRISON, R.; GONCALVES, J. L. M.; ALMEIDA, R. F.; PICCOLO, M. C.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; FERRAZ, A. V.; JAMES, J. N.; MICHELSEN-CORREA, S. Effect of timber harvest intensities and fertilizer application on stocks of soil C, N, P, and S. **Forests**, Basileia, v. 7, n. 12, p. 319, 2016.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 65-90.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Eds.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 281-298.

MEURER, E. J; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 377-382, 1993.

MEURER, E. J; ANGHINONI, I. Utilização de modelo mecanístico para avaliação da disponibilidade de potássio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 73-80, 1994.

MILNE, A. E.; WHEELER, H. C.; LARK, R. M. On testing biological data for the presence of a boundary. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 149, n. 2, p. 213-222, 2006.

MORAIS, E. J.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; BRANDI, R. M. Biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.3, p.353-362, 1990.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus spp.* – níveis críticos de

- implantação e de manutenção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 105-111, 1986.
- PINHEIRO, R. C.; DEUS JUNIOR, J. C.; NOUVELLON, Y.; CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALÓ, L. L.; GUERRINI, I. A.; JOURDAN, C.; LACLAU, J. P. A fast exploration of very deep soil layers by *Eucalyptus* seedlings and clones in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 366, p. 143-152, 2016.
- PINTO, S. I. C. **Cinética de absorção conjunta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de eucalipto**. 2009. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- PINTO, S. I. C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 523-533, 2011.
- PINTO, W. S. **Parâmetros cinéticos da absorção de nitrato e fotossíntese em cafeeiros adultos sob estresse hídrico**. 2016. 41 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- PREZOTTI, L. C.; DEFELIPO, B. V. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 109-114, 1987.
- PULITO, A. P.; GONÇALVES, J. H. T.; SMETHURST, P.; ARTHUR JR., J.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; HÜBNER, A.; MORAES, L. F.; MIRANDA, A.; KAMOGAWA, M.; GAVA, J. L.; CHAVES, R.; SILVA, C. Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in Brazilian eucalypt plantations on soils of contrasting texture. **Forests**, Basileia, v. 6, n. 4, p. 973-991, 2015.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A.; FURLANI A. M. C. (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).
- REATTO, A.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V., V. H.; RESENDE, M.; KER, J. C.; COSTA, L. M. 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, 1998.
- RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 17-23, 1987.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.

RODRIGUES, F. A. V.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L. Produtividade de eucalipto aos 18 meses de idade, na região do Cerrado, em resposta à aplicação de cálcio, via calcário e gesso agrícola. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 67-74, 2016.

ROGERI, D. A; GIANELLO, C.; BORTOLON, L.; AMORIM, M. B. Substitution of clay content for P-Remaining as an index of the phosphorus buffering capacity for soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0140535, 2016.

ROSIM, C. C.; HSING, T. Y.; PAULA, R. C. Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 540-547, 2016.

RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 1015-1018, 1999.

SANES, F. S. M.; CASTILHOS, R. M. V.; SCIVITTARO, W. B.; VAHL, L. C.; MORAIS, J. R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de potássio em genótipos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 688-697, 2013.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, p. 2723-2733, 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. 4, p. 447-457, 2002.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Produção de biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 155-169, 1999.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Eds.). **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: SIF, 2014. p. 161-186.

SANTOS, F. M.; CHAER, G. M.; DINIZ, A. R.; BALIEIRO, F. C. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 384, p. 110-121, 2017.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; HOFFMANN, R. B.; SANTOS, D. Relações quantidade/intensidade de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba – Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 4, p. 338-346, 2013.

SCHNUG, E.; HEYM, J.; ACHWAN, F. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (bolides). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, n. 13-14, p. 2739-2748, 1996.

SHAHEEN, S. M.; TSADILAS, C. D.; RINKLEBE, J. A review of the distribution coefficients of trace elements in soils: Influence of sorption system, element characteristics, and soil colloidal properties. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 201-202, p. 43-56, 2013.

SHATAR, T. M.; McBRATNEY, A. B. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 142, n. 5, p. 553-560, 2004.

SILVA, H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L. A.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 67-78, 2013.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 275-374.

SILVA, I. R.; FURTINI NETO, A. E.; FERNANDES, L. A.; CURI, N.; VALE, F. R. Formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n.10, p. 2065-2073, 2000.

SIMONETE, M. A.; CHAVES, D. M.; TEIXEIRA, C. F. A.; MORO, L.; NEVES, C. U. Fornecimento de cálcio para plantas de *Eucalyptus saligna* por meio de aplicação de resíduo industrial lama de cal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1343-1351, 2013.

SOUSA, J. S. **Análise foliar para ajuste da recomendação de adubação do cafeeiro**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SOUSA, J. S.; NEVES, J. C. L.; MARTINEZ, H. E. P.; ALVAREZ V., V. H. Relationship between coffee leaf analysis and soil chemical analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170109, 2018.

SOUZA, B. P. **Aspectos fisiológicos e moleculares da absorção e metabolismo do nitrogênio e do déficit hídrico em café arábica**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

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

TITTONELL, P.; GILLER, K. E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 76-90, 2013.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação**. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

TURNER, J.; LAMBERT, M.J. Nutrient cycling in age sequences of two *Eucalyptus* plantation species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 1701-1712, 2008.

VALE, F. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; SANT'ANA, R. Efeito do alumínio sobre a cinética de absorção de amônio e nitrato em raízes intactas de *Eucalyptus alba*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 8, n. 2, p. 123-132, 1984a.

VALE, F. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; SANT'ANA, R. Efeito do alumínio, na presença de amônio e nitrato, sobre a cinética de absorção e translocação de fosfato em *Eucalyptus alba*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 8, n. 2, p. 133-141, 1984b.

VARGAS, R. M. B.; MEURER, E. J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 143-148, 1983.

VENTURIN, N.; CAMPINHOS JÚNIOR, E.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P. Histórico. In: VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Eds.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: SIF, 2014. p. 17-38.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-

fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 91-96, 1984.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 685-692, 1998.

WAIREGI, L. W. I., VAN ASTEN, P. J. A., TENYWA, M. M., BEKUNDA, M. A. Abiotic constraints override biotic constraints in East African highland banana systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.117, n.1, p.146-153, 2010.

WALWORTH, J. L.; LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Use of Boundary Lines in establishing diagnostic norms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 1, p. 123-128, 1986.

WANG, N.; JASSOGNE, L.; VAN ASTEN P.J.A.; MUKASA, D.; WANYAMA, I.; KAGEZI, G.; GILLER, K. E. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 63, p. 1-11, 2015.

WEBB, R. Use of the boundary line in the analysis of biological data. **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 47, n. 3, p. 309-319, 1972.