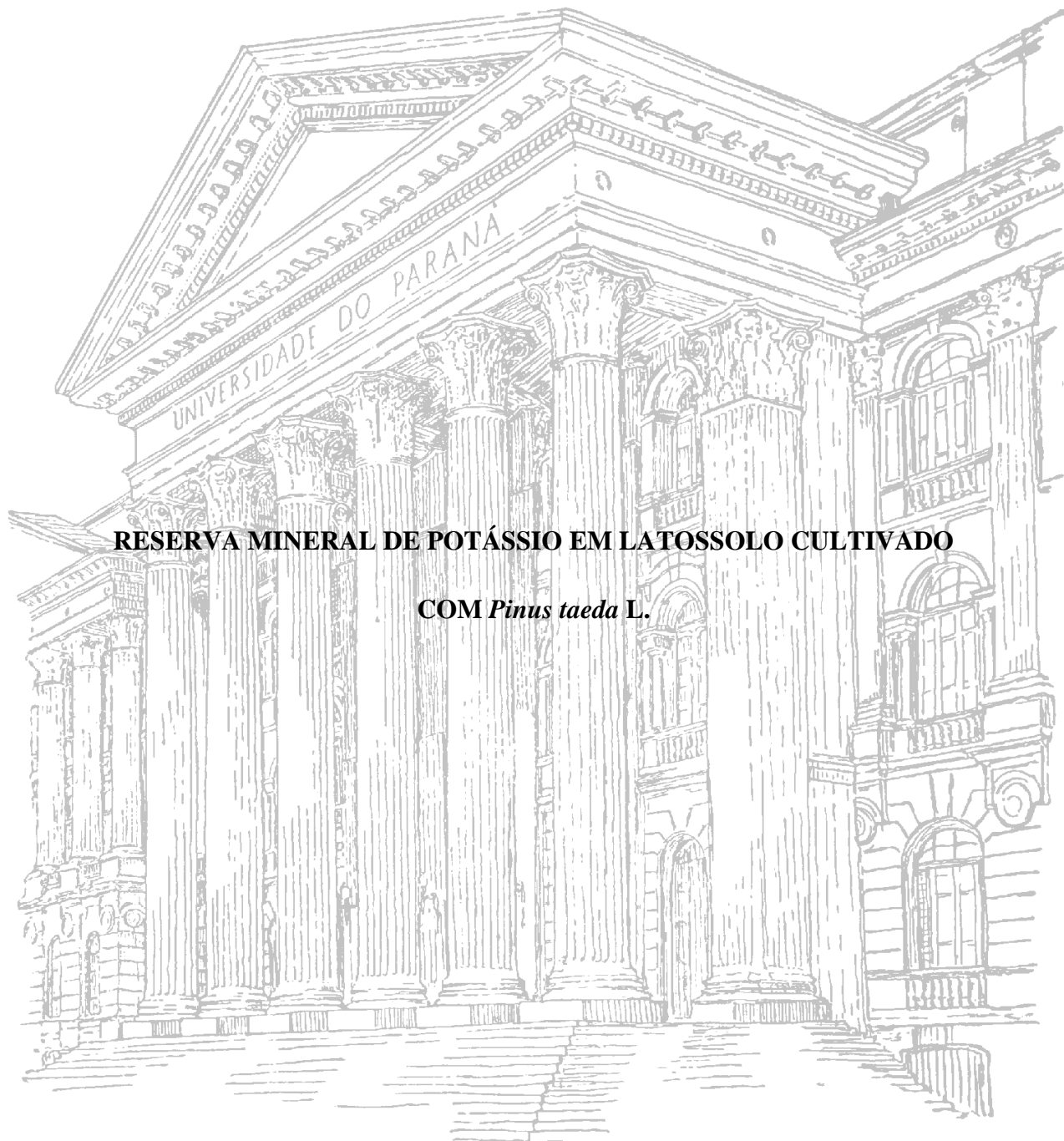


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MICHAEL JONATHAN FERNANDES ALVES



RESERVA MINERAL DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO CULTIVADO

COM *Pinus taeda* L.

CURITIBA

2012

MICHAEL JONATHAN FERNANDES ALVES

RESERVA MINERAL DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO CULTIVADO

COM *Pinus taeda* L.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Bruno Reissmann

CURITIBA

2012



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA DO SOLO

PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato MICHAEL JONATHAN FERNANDES ALVES, sob o título: "Reserva mineral de potássio em Latossolo cultivado com *Pinus taeda* L.", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Solo e Ambiente".

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 21 de Junho de 2012.

Prof. Dr. Vander de Freitas Melo, Presidente

Profª. Drª. Sílvia Schimidlin Kell, Iª. Examinadora

Prof. Dr. Volnei Pauletti, IIª. Examinador

DEDICATÓRIA

A minha primeira dedicatória é ao meu grande Deus, senhor dos senhores, e reis dos reis, o meu grande inspirador, o qual deu prova do teu grande amor e zelo por minha vida, e que jamais me deixou, mesmo quando caminhei pelos caminhos mais tortuosos. Em momentos de fraquezas quando não podia mais caminhar ele me levou em teus braços, quando me cansava da jornada ele sempre me consolava e mandava pessoas a me dar uma palavra de conforto, quando humilhado ele sempre se levantou a meu favor, ele sempre prometeu e como está escrito: Deus escolheu as coisas loucas do mundo para confundir os sábios; e Deus escolheu as coisas fracas do mundo para confundir as fortes; e Deus escolheu as coisas ignóbeis do mundo, e as desprezadas, e as que não são, para reduzir a nada as que são; Para que nenhum mortal se glorie na presença de Deus. Mas vós sois dele, em Cristo Jesus, o qual para nós foi feito por Deus sabedoria, e justiça, e santificação, e redenção; Para que, como está escrito: Aquele que se gloria, glorie-se no Senhor. (1 Coríntios 1:27-31)

Agradeço a meu senhor Deus por jamais me esquecer em nenhum momento, por me livrar dos maus caminhos, e me dar vitória sobre meus inimigos, os quais podem ver a grandeza do meu senhor por meu reflexo, eu quero que cada dia que se passe eu seja menor ainda o Deus, para que vejam a ti não a mim, pois grande es tu, todos meus os feitos na minha vida consagro a ti o Deus pois foi tu que me deste, foi tu que fizeste, até meus sonhos foi você quem me deu.

Agradeço a ti meu Deus, pois até aqui me levaste e me entrego a ti para que me use a teu favor pois em tuas mãos não tenho medo pois grandioso es tu.

Aos meus pais, Francisco Alves Ferreira Fernandes e Sandra Aparecida Fernandes Alves, meu grande irmão, Steve Jasson Fernandes Alves, meus avós, Alcina Florinda David e Remi Fernandes David.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria e estratégias ao longo da jornada, por sempre cuidar de mim e jamais ter deixado que eu desanimasse e parasse no meio do caminho. Obrigado senhor por sempre me alcançar com tuas sábias palavras.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vander de Freitas Melo, por este vínculo maior que uma grande amizade, orientação, ensinamentos, confiança, paciência, eloquentes aulas e fundamental colaboração para o término desta dissertação.

Aos professores do Programa com os quais tive o privilégio de aprender e poder desenvolver todo o andamento deste trabalho. Principalmente com o Prof. Dr. Bruno Carlos Reissmann, um homem valoroso cheio de qualidades e um enorme coração.

Aos professores que participaram da banca, Profa. Dra. Sílvia Schimidlin Keil e Prof. Dr. Volnei Pauletti, que tanto puderam contribuir com a finalização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Gerson, Elda, Roberto e Aldair, em especial a Maria, por tudo que me ensinou no laboratório de Mineralogia, pela presteza, amizade, exemplo de humildade, paciência e por sempre nos tratar com grande carinho.

A todos os meus colegas e amigos que direta ou indiretamente muito colaboraram para a realização deste trabalho, em especial, Eduardo de Paula Menezes, João Paulo Viana e o Wilson Wagner. Muito obrigado a todos

Aos meus amigos e familiares.

Em especial meus pais, Sandra Aparecida Fernandes Alves e Francisco Alves Ferreira Fernandes, pelo amor, confiança, crédito, e enorme incentivo e interseção junto a Deus.

A meu grande irmão Steve Jasson Fernandes Alves, que sempre esteve no mesmo caminho acadêmico por compartilhar as mesmas paixões, sempre esteve me ajudando com suas palavras força e presença.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realizar este trabalho e à CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

E a todas as pessoas que não foram citadas mais de alguma forma contribuíram para sua conclusão, sintam-se abraçadas, Muito Obrigado.

Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal algum, porque tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.

Salmos 23:4

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Difratoograma de raios-X (radiação Cu K α) da fração areia do horizonte A1 do perfil 1. Qz - quartzo, RMi - resíduo de mica, RCt - resíduo de caulinita.....19
- FIGURA 2 - Difratoogramas de raios-X (radiação Cu K α) da fração argila do horizonte A1 do perfil 1, mostrando a mineralogia com os tratamentos sequenciais: sem tratamentos (A); após DCB (B); após NaOH 5mol L⁻¹(C). Qz - quartzo, Ct - caulinita, Hm - hematita, Gb - gibsita, Mi - mica, Ananatásio.....20
- FIGURA 3 - Teores de K nos horizontes A1, A2, BA, B1, B2 dos perfis de solos extraídos com diferentes concentrações de HNO₃ fervente: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 mol L⁻¹23

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	TEOR E CONTEÚDO DE K EM 100 ACÍCULAS DE CINCO PLANTAS TESTEMUNHAS DO TRABALHO DE KASEKER (2012) ⁽¹⁾	15
Quadro 2 -	Análise textural e química dos solos ⁽¹⁾	18
Quadro 3 -	Teores trocáveis e totais de K dos solos.....	22
Quadro 4 -	Coefficientes de correlação (r) entre teores de K extraídos do solo por diferentes métodos e os teores do nutriente em diferentes lançamentos das árvores (Quadro 1) ⁽¹⁾	24
Quadro 5 -	Coefficientes de correlação (r) entre teores de K do solo extraídos por diferentes métodos e os conteúdos do nutriente em diferentes lançamentos das árvores (Quadro 1) ⁽¹⁾	25
Quadro 6 -	Matriz de correlação (valores de r) entre teores de K obtidos por diferentes métodos de extração nos solos ⁽¹⁾	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1 Descrição geral da área e coleta de amostras.....	13
2.2 Análise textural da TFSA e química das amostras de serapilheira e da TFSA.....	15
2.3 Análises mineralógicas das frações do solo.....	16
2.4. Análise dos dados	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
3.1. Características físicas e químicas do solo.....	16
3.2. Mineralogia das frações areia e silte.....	18
3.3. Reserva de potássio do solo.....	21
3.4. Relação entre formas de K no solo e absorção do nutriente pelas árvores.....	23
4. CONCLUSÕES.....	27
5. LITERATURA CITADA.....	28

RESERVA MINERAL DE POTÁSSIO EM LATOSSOLO CULTIVADO COM *Pinus taeda* L.¹

Autor: Michael Jonathan Fernandes Alves

Orientador: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo

Co-Orientadora: Prof. Dr. Bruno Carlos Reissmann

RESUMO

No Brasil, aproximadamente 1,87 milhões de hectares são plantados com as espécies de *Pinus*, normalmente em solos pobres quimicamente. O presente trabalho objetivou estudar a mineralogia das frações areia, silte e argila e estimar a reserva mineral de K por diferentes métodos de extrações químicas em solo naturalmente pobre nesse nutriente e cultivado com *Pinus taeda*, no Segundo Planalto Paranaense. Foram selecionadas cinco árvores com maior diâmetro (árvores dominantes), em uma área de 0,5 ha, para abertura de uma trincheira (1,6 m) na projeção da copa de cada árvore. Todos os perfis foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico e apresentaram similaridade na morfologia e na sequência dos horizontes, cujas profundidades médias foram: O = 4 cm, A1= 0-9 cm, A2= 9-24 cm, BA= 24-43 cm, B1= 43-66 cm, B2= 66-160⁺ cm. As amostras de solo coletadas em cada horizonte foram submetidas a análises físicas, químicas e mineralógicas. As frações areia e silte dos solos apresentaram mineralogia bastante uniforme, com predomínio absoluto de quartzo e apenas ocorrência de discretas reflexões de mica por difratometria de raios X (DRX). A fração argila também apresentou limitada ocorrência de minerais micáceos. Os tratamentos sequenciais para remoção de óxidos de Fe, gibbsita e caulinita foram eficientes para concentração de mica na fração argila, o que facilitou a identificação de biotita e muscovita por DRX. Os baixos teores de K não trocável obtidos com diferentes concentrações de HNO₃ fervente (máximo de 91 mg kg⁻¹) e de K total (máximo de 202,7 mg kg⁻¹) foram consistentes com a mineralogia das frações do solo. As correlações positivas e significativas entre os teores não trocáveis de K no solo e os teores e conteúdo do nutriente nas árvores indicam a importância de formas de reservas do nutriente na nutrição da espécie em solos altamente intemperizados e pobres em K trocável.

Palavras-chave: Mica, extração nítrica, K não trocável, K total.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (29 p.) Junho, 2012.

MINERAL RESERVE OF POTASSIUM IN OXISOL CULTIVATED WITH *Pinus taeda* *L*¹

Author: Michael Jonathan Fernandes Alves

Advisor: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo

Co- Advisor: Prof. Dr. Bruno Carlos Reissmann

ABSTRACT

In Brazil, approximately 1.87 million of hectares are planted with *Pinus* species, usually on poor chemically soils. The present study investigated the mineralogy of sand, silt and clay fractions and estimated the mineral reserve of K for different of chemical extractions methods in soil naturally poor in this nutrient and planted with *Pinus taeda*, the in the Second Paraná Plateau. It were selected five trees with larger diameter (dominant trees), in an area of 0.5 ha, to dig a soil profile (1.6 m) in the canopy projection of each tree. All profiles were classified as Oxisol and showed similarity in morphology and sequence of horizons, whose average depths were: O = 4 cm, A1= 0-9 cm, A2= 9-24 cm, BA= 24-43 cm, B1= 43-66 cm, B2= 66-160+ cm. Soil samples collected from each horizon were submitted to physical, chemical and mineralogical analysis. The sand and silt fractions of soil mineralogy were fairly uniform, with a predominance of quartz and only occurrence of discrete reflections of mica by X-ray diffraction (XRD). The clay fraction also showed limited occurrence of micaceous minerals. The sequential treatments for removal of Fe oxides, gibbsite and kaolinite were effective for concentration of mica in the clay fraction, which facilitated the identification of biotite and muscovite by XRD. The low concentrations of no exchangeable K obtained with different boiling concentrations of HNO₃ (up to 91 mg kg⁻¹) and total K (maximum of 202.7 mg kg⁻¹) were consistent with the mineralogy of the soil fractions. The significant and positive correlations between no exchangeable soil K and the nutrient concentrations and contents of the trees indicate the importance of the nutrient reserve forms in the nutrition of the species in highly weathered soils and with low exchangeable K.

Key-Word: Mica, nitric extraction, non-exchangeable K, total K.

¹Master's Thesis in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Division of Agricultural Sciences, Federal University of Parana. Curitiba. (29 p.) June, 2012.

1 INTRODUÇÃO

O K é um elemento vital envolvido na nutrição inorgânica das plantas, pois participa de vários processos bioquímicos e fisiológicos nas plantas, tais como: ativador de várias enzimas (Evans e Sorger, 1986), no status de água da planta e na expansão celular (Mengel e Arnek, 1982), no controle estomático (Raschke, 1975), no processo fotossintético (Demmig e Gimmler, 1983) e no carregamento do floema e transporte de fotoassimilados (Mengel e Haeder, 1977).

Devida a importância na nutrição das plantas e sua maior associação com minerais primários nas frações do solo, o estudo da reserva de K tem sido alvo de muitos pesquisadores. Os solos jovens do Brasil, desenvolvidos de materiais de origem ricos em mica e feldspato, podem apresentar teores de K total da ordem de 35.000 mg kg⁻¹ (Melo et al., 1995). Por outro lado, os solos altamente intemperizados dos trópicos úmidos apresentam teores de K total, normalmente, da ordem de 300 a 2.000 mg kg⁻¹ (Loganathan et al. 1995; Silva et al., 2000). Nesses solos, estudos mineralógicos utilizando métodos e ferramentas tradicionais, destacando-se a difratometria de raios-X, empregada em amostras de terra fina e da fração argila total (sem tratamento prévio para remoção e concentração de minerais), não apresentam sensibilidade suficiente para detectar as possíveis fontes minerais desses baixos teores de K total (Melo et al., 2003).

Na interface solo-planta, os métodos mais utilizados para estimar a contribuição da reserva de K na nutrição de plantas tem sido feita, em diversos estudos, utilizando cultivos sucessivos, extrações químicas empregando HNO₃ fervente 1 mol L⁻¹, lavagens sucessivas com HCl 0,01 mol L⁻¹, ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico e oxálico) e resinas trocadoras de cátions (Simard et al., 1992; Martins et al., 2004). Esses métodos têm apresentado boa correlação com o K absorvido pelas plantas (Benipal e Pasricha, 2002). De acordo com Martins et al. (2004) a contribuição de formas não trocáveis de K no total absorvido pelo trigo, em um único cultivo, variou de 0 a 54%. Nos solos com maior teor de K, as plantas absorveram apenas formas trocáveis do nutriente.

A participação de formas não trocáveis de K deve ser ainda mais expressiva para espécies florestais, que permanecem a campo por um longo período e modificam intensamente as condições químicas do solo, principalmente na região da rizosfera, por exsudação de prótons e de ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Melo et al. (1995) observaram que as formas não trocáveis de K foram importantes na nutrição do eucalipto (povoamentos de 7 anos) ao longo do cultivo, conforme indicado pelos maiores valores de

coeficientes de correlação entre o K na planta e seus teores no solo obtidos com soluções diluídas de HNO₃.

No Brasil, aproximadamente 4,8 milhões de hectares, são cultivados com espécies florestais de rápido crescimento, sendo que deste total, cerca de 1,87 milhões de hectares correspondem a espécies de *Pinus* (Kaseker, 2012), geralmente implantadas em áreas cujos solos são pobres quimicamente. Mesmo assim, esta cultura consegue sobressair à carência de nutrientes do solo, e uma das possibilidades é a habilidade das plantas em acelerar o intemperismo de minerais primários fontes de nutrientes. Considerando que o pH do solo de parte expressiva sob povoamentos de pinus, sobretudo no Segundo Planalto Paranaense, é bastante ácido, chegando a valores de 3,5 a 3,7 (Wisniewski e Reissmann, 1996), tem-se um favorecimento das reações de hidrólise e de alterações mineralógicas nas frações do solo.

A participação das formas de reserva K na nutrição do *Pinus sylvestris* foi demonstrada no trabalho de Wallander e Wickman (1999), por meio de avaliações de crescimento, de absorção do nutriente e da taxa de intemperização de biotita no solo. Esses dados indicam que a absorção de formas minerais não trocáveis e estruturais de K pode ser o principal motivo para a falta de resposta do *Pinus* às fertilizações potássicas em solos pobres quimicamente. Kaseker (2012) trabalhou na mesma área do presente estudo (Município de Ponta Grossa (PR), com Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, originado de arenito, constituído de quartzo com cimento argiloso) e avaliou o crescimento e os teores foliares de nutrientes de plantas de *Pinus taeda* de segunda rotação com sete anos de idade submetidas a diferentes tratamentos com adubação de N, P, K, Ca e Mg (calagem) e micronutrientes. Com relação ao K, mesmo com teores trocáveis naturais extremamente baixos nos solos (0,03 cmol_c kg⁻¹), não houve resposta nutricional das árvores a aplicação de 80 kg ha⁻¹ do nutriente. dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi estudar a mineralogia das frações areia, silte e argila e estimar a reserva mineral de k do solo por diferentes métodos de extrações químicas e avaliar sua importância na nutrição do *pinus taeda* em latossolo naturalmente pobre no nutriente, no segundo planalto paranaense.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição geral da área e coleta de amostras

O estudo foi desenvolvido em junho de 2011, no município de Ponta Grossa (PR), nas coordenadas geográficas de 25°17'45" S e 49°55'54" O, em povoamentos de *Pinus taeda* L. de segunda rotação, com sete anos de idade. No primeiro ciclo as arvores foram cortadas com

40 anos de idade e houve apenas fertilização fosfatada no plantio. Já na segunda rotação não houve adição de nutrientes ao solo. Foram selecionadas cinco árvores (repetições) com maior diâmetro, de acordo com as considerações de árvores dominantes de Blum e Hildebrand (1997), em uma área de 0,5 ha para abertura de uma trincheira na projeção da copa de cada árvore. A declividade média da área era de 5% e para se ter maior homogeneidade pedológica entre as cinco repetições, os perfis foram situadas em faixa longitudinal à declividade, no terço médio da encosta. As trincheiras foram abertas até 1,7 m de profundidade e os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico. O material de origem dos solos da região é o Arenito da Formação Ponta Grossa.

Após descrição morfológica de perfis coletaram-se amostra de serapilheira do horizonte O e de solo em cinco horizontes. Todos os perfis apresentaram morfologia e sequência dos horizontes semelhantes, cujas profundidades médias foram de: O = 4 - 0 cm, A1 = 0 - 9 cm, A2 = 9 - 24 cm, BA = 24 - 43 cm, B1 = 43 - 66 cm, B2 = 66 - 160⁺ cm. Os resíduos de material vegetal do horizonte O foram secados em estufa a 60° C e moídos e as amostras de solo foram secadas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Para verificar a distribuição do sistema radicular no perfil coletou-se um bloco de solo de aproximadamente 2000 cm³, amostrando toda a espessura de cada horizonte mineral. A única exceção foi para o horizonte B2, que devido a sua maior espessura, consideraram-se apenas os 20 cm iniciais (66 a 86 cm) para amostragem. No laboratório, o solo foi destorroado e as raízes separadas manualmente para medição do tamanho total. Após secagem em estufa a 60 ° C até peso constante determinou-se a massa seca das raízes.

Kaseker (2012) realizou estudos de fertilização com N, P, K, Ca e Mg (calagem) e micronutrientes na mesma época e área experimental. As cinco árvores dominantes usadas como testemunhas no trabalho de Kaseker (2012) foram às mesmas selecionadas para a abertura das trincheiras no presente estudo. Dessa forma, os dados de análise foliar apresentado na Quadro 1 foram obtidos por Kaseker (2012), nas seguintes condições: i) coleta de acículas em junho de 2011 - coleta de verticilo vivo, com exposição para a fase norte. O ramo foi separado em três lançamentos, da base para a ponta: 2º lançamento do verão de 2009 (dezembro a maio) - 2L09, 1º lançamento da primavera de 2010 (julho a dezembro) - 1L10, 2º lançamento do verão de 2010 - 2L10; ii) coleta de acículas em setembro de 2001 - coleta de verticilo vivo, com exposição para a fase norte. O ramo foi separado em três lançamentos, da base para a ponta: nova coleta ou repetição (R) do 1º lançamento do verão de 2010 - 1L10R, repetição (R) do 2º lançamento de 2010 - 2L10R, coleta do lançamento da estação (primavera

de 2011) - como a coleta foi no meio do período de crescimento (julho a dezembro), as acículas não estavam maduras (fase de pendão - P11); iii) O material vegetal foi lavado com água deionizada, seco em estufa a 60° C e moído; iv) os teores de K foram analisados por espectrometria de emissão de chama após digestão total do material vegetal a 500° C em mufla e solubilização com HCl 3 mol L⁻¹; v) utilizando o teor de K e o peso das 100 acículas de cada amostra foi calculado o conteúdo do nutriente nas acículas, com exceção do pendão.

Quadro 1. Teor e conteúdo de K em 100 acículas de cinco plantas testemunhas do trabalho de Kaseker (2012)⁽¹⁾

Repetição	Teor (g kg ⁻¹) / Conteúdo (mg 100 acículas ⁻¹)					
	2L09	1L10	2L10	1L10R	2L10R	P11
1	2,8 / 14,1	4,0 / 16,5	4,9 / 29,8	2,7 / 17,0	2,6 / 13,5	4,6 / -
2	2,4 / 17,9	3,5 / 14,6	3,1 / 17,7	2,5 / 23,1	2,4 / 10,7	3,9 / -
3	4,3 / 21,1	3,6 / 13,8	3,6 / 14,2	1,9 / 10,9	2,4 / 6,3	4,1 / -
4	4,0 / 19,7	3,8 / 15,3	3,5 / 14,0	2,7 / 17,2	2,1 / 2,8	5,2 / -
5	3,3 / 16,1	3,8 / 26,0	3,2 / 16,4	2,4 / 13,5	2,2 / 8,3	3,7 / -
Média	3,4 / 17,8	3,7 / 17,3	3,7 / 18,4	2,5 / 16,4	2,4 / 8,3	4,3 / -

⁽¹⁾2L09- segundo lançamento de 2009; 1L10 e 2L10- primeiro e segundo lançamentos de 2010; 1L10R e 2L10R - nova coleta após 3 meses do primeiro e segundo lançamentos de 2010; P11- pendão de crescimento em 2011 devido ao reduzido tamanho das acículas no pendão não foi possível obter a massa de 100 acículas e o conteúdo de K.

2.2 Análise textural da TFSA e química das amostras de serapilheira e da TFSA

A análise textural foi conduzida pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). Para a caracterização química de rotina (fertilidade) foram utilizados os métodos descritos em Embrapa (1997): pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; carbono orgânico (dicromato de Na); acidez potencial não-trocável (H) (acetato de Ca 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0); Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); K⁺ trocável e P disponível (Mehlich 1).

Utilizando-se concentrações crescentes de HNO₃ fervente (0,25; 0,5; 1; 2 e 4 mol L⁻¹) determinaram-se os teores de K não trocáveis por aquecimento da mistura amostra solução ácida por 25 minutos a 113 °C (Pratt e Morse, 1954). Os teores de K foram determinados nos extratos por espectrometria de emissão de chama. Para determinação de teores totais de K as amostras foram digeridos em forno de microondas colocando-se aproximadamente 0,2 g de amostra, na presença de 4 mL de HNO₃, 3 mL de HF concentrados e 1 mL de H₂O₂ 30% (v/v) (Melo et al., 2002).

2.3 Análises mineralógicas das frações do solo

As amostras de TFSA foram tratadas com H_2O_2 a 30% (v/v) para remoção de matéria orgânica, e com NaOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ para dispersão das partículas. Após esses tratamentos prévios, a fração areia foi retida em peneira de 0,05 mm e as frações argila e silte foram recolhidas em provetas de 1000 mL e separadas por sedimentação com base na lei de Stokes (Melo et al., 2001).

As amostras de areia silte e argila foram moídas em almofariz e montadas em placas perfuradas (amostras não orientadas) para a identificação dos minerais por difratometria de raios X (DRX). Os difratogramas foram obtidos em goniômetro vertical, com velocidade de $1^\circ 20\text{min}^{-1}$ e amplitude de 4 a $65^\circ 2\theta$. O difratômetro, equipado com tubo de Ni e utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$, foi operado a 20 mA e 40 kV.

Para determinar os teores e a composição química dos óxidos de Fe de baixa cristalinidade e óxidos de Fe mais cristalinos, foram utilizadas extrações com oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, pH 3,0 (AO) e ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), respectivamente, conforme detalhes apresentados por Melo et al. (2001). Os teores de Fe foram determinados por espectrometria de absorção atômica. Para concentrar minerais filossilicatados 2:1, o resíduo da extração com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) foi tratado com NaOH 5 mol L^{-1} a quente para a remoção de caulinita e gibbsita (Kämpf e Schwertmann, 1982). O resíduo do tratamento sequencial com DCB e NaOH 5 mol L^{-1} foi analisado por DRX em uma amplitude de varredura de 4 a $40^\circ 2\theta$.

2.4 Análise dos dados

Os teores de K determinados por diferentes métodos de extração foram correlacionados (correlação de Pearson) com os teores e conteúdo de nutrientes nas árvores (Quadro 1). As análises foram feitas utilizando-se o Programa SAEG desenvolvido pelo Centro de Processamento de Dados da Universidade Federal de Viçosa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características físicas e químicas do solo

Os baixos teores da fração argila são coerentes com o material de origem da região: Arenito da Formação Ponta Grossa. O horizonte O apresentou os maiores teores de soma de

bases (SB), evidenciando a importância da matéria orgânica na manutenção da fertilidade do solo. Contudo, mesmo sendo superior, a SB média do horizonte orgânico foi de apenas 2 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Quadro 2). Uma evidência do processo de formação de fração húmica nesse horizonte é a elevada acidez potencial não trocável (H), que fez com que o valor médio de CTC pH 7,0 fosse da ordem de 16 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Dessa forma, além de contribuir para a liberação de nutrientes para as plantas pelo processo de ciclagem, o horizonte O apresenta maior capacidade adsortiva do perfil, o que contribui para redução da lixiviação de bases. Foi possível identificar a campo no horizonte O as camadas Ln, Lv e Fr, com boa parte de substância fina, potencialmente capaz de formar a camada H da classificação de Babel (1971).

Com a ausência de adubação com bases durante o primeiro e segundo ciclos de *Pinus taeda* na área de estudo (aproximadamente 47 anos), a fonte primária de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ acumulados na serapilheira foi o intemperismo lento e paulatino de minerais primários fontes de nutrientes (reserva mineral). Portanto, o sistema orgânico e mineral está intimamente integrado no tamponamento de formas trocáveis de nutrientes. Como não houve reposição de bases exportadas no primeiro corte das árvores, a manutenção do crescimento no segundo ciclo é ainda mais dependente da reserva mineral do solo, que transferiu e ainda transfere nutrientes para as plantas e por consequência, para o horizonte orgânico.

Para os horizontes minerais observou-se baixa fertilidade e teores relativamente altos de Al^{3+} . O pequeno aumento nos valores de SB em profundidade acompanhou os incrementos de argila do horizonte A2 para o B2. O horizonte O apresentou maior valor de CTC pH 7,0 que os horizontes subsequentes, mas grande parte das cargas negativas estava saturada com Al^{3+} (maior valor de m%). Os teores de K^+ trocáveis foram próximos à zero, o que indicaria dificuldades de crescimento das árvores. Contudo, no estudo de Kaseker (2012) conduzido na mesma área, não houve resposta nutricional e no crescimento das árvores à fertilização potássica. Esse comportamento é devido ao tamponamento, mesmo em níveis baixos, do K^+ trocável pelas formas de reserva do nutriente. As árvores com sete anos de idade não apresentavam sintomas de deficiência de K.

Quadro 2. Análise textural e química dos solos⁽¹⁾

	pH	Al	H+Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC pH 7,0
Horiz.	CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----						
O	3,0	2,3	14,0	1,68	0,20	0,284	2,16	16,2
A1	3,6	1,8	8,1	0,64	0,07	0,018	0,72	8,8
A2	3,9	1,2	4,4	0,65	0,05	0,013	0,71	5,1
BA	4,0	0,9	3,2	0,74	0,04	0,008	0,78	4,0
B1	4,1	0,9	3,1	0,81	0,03	0,008	0,84	4,0
B2	4,1	0,9	2,9	0,84	0,02	0,005	0,86	3,8
Horiz.	P	C.O.	V	m	Ca/Mg	Areia	Silte	Argila
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	%	%		----- g kg ⁻¹ -----		
O	10,8	136,9	12	52	8,6	-	-	-
A1	5,0	22,7	8	71	10,2	814	18	168
A2	2,2	12,3	14	62	14,8	817	14	169
BA	0,6	10,2	20	52	18,5	795	24	181
B1	0,1	8,4	21	52	27,8	733	30	237
B2	0,4	6,7	23	50	27,8	689	35	276

⁽¹⁾Valores médios de cinco repetições. SB - soma de bases. C.O. - Carbono orgânico.

3.2 Mineralogia das frações areia, silte e argila do solo

As amostras das frações areia e silte dos solos apresentaram mineralogia bastante uniforme, com predomínio absoluto de quartzo e ocorrência apenas de discretas reflexões basais de primeira ordem de mica e de caulinita nas duas frações. Um exemplo desse padrão de difração de raios X (DRX) foi apresentado na Figura 1. Mesmo sendo uma análise qualitativa, as intensidades das reflexões nos difratogramas refletem a quantidade e a cristalinidade dos minerais. Por esse motivo, as reflexões de baixa intensidade de mica e caulinita, formando apenas pequeno ombro acima da linha de base, foram usadas para classificar a ocorrência desses minerais como fase residual na Figura 1. Resíduos de mica nas frações mais grosseiras de solos originados de arenito também foram observados por DRX por outros autores (Melo et. al., 1995).

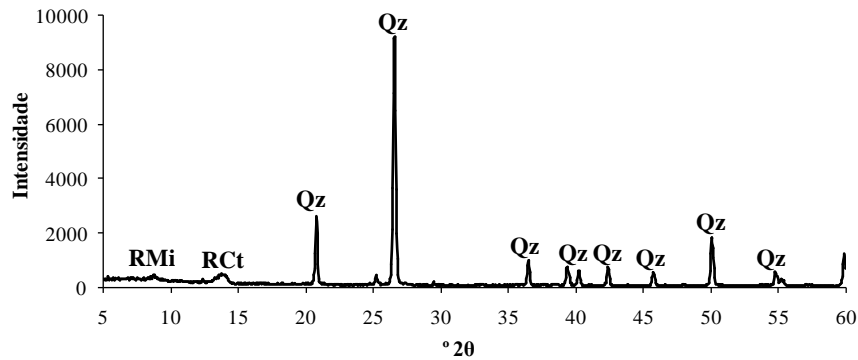


Figura 1. Difratograma de raios-X (radiação Cu K α) da fração areia do horizonte A1 do perfil 1. Qz - quartzo, RMI - resíduo de mica, RCt - resíduo de caulinita.

Mesmo em pequena quantidade, a ocorrência de minerais micáceos pode ser importante para o tamponamento de K⁺ trocável no solo, embora a taxa de liberação do nutriente das frações grosseiras é menor em relação a partículas de mica com menor diâmetro. Simard et al. (1992) em solos do Canadá em estudos de cinética de liberação de K⁺ (3200 h) com ácido cítrico 0,5 mol L⁻¹ também verificaram a liberação mais lenta de K⁺ das frações areia dos solos.

Os dados da DRX evidenciaram grande uniformidade na mineralogia da fração argila dos horizontes dos cinco perfis de solo, com predomínio de caulinita e menores quantidades de gibbsita, hematita e quartzo. Em todos os horizontes verificou-se discreta reflexão em 1,0 nm (8,9 °2 θ - radiação CuK α), característica de minerais micáceos (Figura 2A). As intensas reflexões em 0,485 nm (18,3 °2 θ), atribuídas ao conjunto de planos (002) da gibbsita, refletem o intenso processo de intemperismo e remoção de sílica solúvel do Latossolo em estudo.

Entre os minerais secundários encontrados na fração argila, apenas a caulinita pode abrigar efetivamente formas estruturais de K (Melo et. al., 2003). Em Latossolos cauliniticos de diferentes regiões do Brasil, Melo et al., (2002) encontraram mais de 50% do K total da fração argila associado às partículas de caulinita. A presença de K na caulinita é atribuída à ocorrência de camadas residuais de mica preservada na estrutura do mineral. Melo et. al. (2002) analisaram amostras de caulinita da fração argila de diferentes classes de solos do Brasil e observaram variação nos teores de K de 0,07 a 3,18 g kg⁻¹. Contudo, considerando a alta estabilidade da caulinita nos solos, espera-se que a liberação do K estrutural das camadas de mica preservadas na estrutura da caulinita seja muito restrita, o que, praticamente, inviabiliza a utilização dessa reserva pelas plantas, mesmo após 47 anos de cultivo de *Pinus* na área de estudo.

Os picos basais de mica (001 - 1,0 nm ou $8,9^\circ 2\theta$ e 002 - 0,5 nm ou $18^\circ 2\theta$) foram amplificados após submeter a fração argila de todas as amostras aos tratamentos sequenciais com DCD e NaOH 5 mol L^{-1} (Figura 2). Com esses tratamentos foi possível extrair os óxidos de Fe, caulinita e gibbsita e concentrar os minerais filossilicatados do tipo 2:1.

A relação entre intensidade (I) dos picos (001) e (002) da mica (Figura 2C) foi muito superior à unidade ($R = I(001) / I(002) = 950/493 = 1,9$). Segundo Pal et al. (2001) valores de R próximos de 1,0 indicam a ocorrência de apenas muscovita (mica dioctaedral), e no caso de mistura de muscovita e biotita, ambas irão contribuir para intensidade da reflexão basal (001) enquanto a contribuição da biotita para a reflexão (002) é inexpressiva, resultando em alto valor para a relação das intensidades das reflexões (Figura 2C). Dessa forma, a ocorrência de partículas de biotita na fração argila dos solos em estudo deve favorecer a liberação de K estrutural para as plantas, devido à sua maior susceptibilidade ao intemperismo em relação às micas dioctaedrais (Simard et al., 1992).

Outros autores também encontraram resíduos de mica na fração argila de solos altamente intemperizados (Melo et al., 2002). As bases (Ca, Mg, K) concentram-se no interior de micro agregados, comuns nos Latossolos, o que limita a lixiviação em razão do reduzido tamanho dos poros (Melo et al., 2003). Esta concentração relativa de sílica e cátions básicos nos micro agregados dos solos altamente intemperizados pode ser responsável pela resistência de partículas de mica ao intemperismo, o que aumenta a reserva de K.

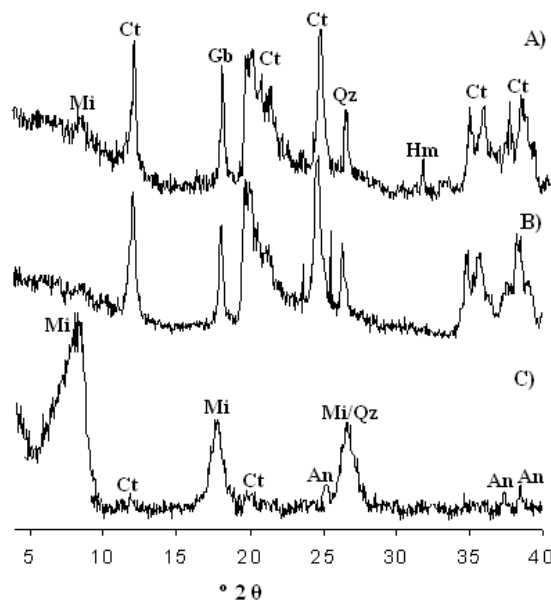


Figura 2. Difratogramas de raios-X (radiação Cu K α) da fração argila do horizonte A1 do perfil 1, mostrando a mineralogia com os tratamentos sequenciais: sem tratamentos (A); após DCB (B); após NaOH 5 mol L^{-1} (C). Qz - quartzo, Ct - caulinita, Hm - hematita, Gb - gibbsita, Mi - mica, An - anatásio.

3.3 Reserva de potássio do solo

Os perfis mostraram comportamento semelhante quanto ao teor de K (Quadro 3 e Figura 3). O K foi continuamente extraído de fontes minerais (formas trocáveis e de reserva) durante o tempo total de cultivo pelas árvores (47 anos) e por acúmulo de resíduos vegetais, principalmente acículas na superfície do solo, formou-se o horizonte O, com maiores teores de nutrientes em todos os perfis. Como a área não recebeu fertilização potássica tem-se a comprovação que a fonte primária do K acumulado na serapilheira foi os minerais primários e secundários do solo (reserva mineral). Os horizontes minerais mais superficiais, principalmente A1 e A2, apresentaram os menores teores de argila (Quadro2) e teores de K total (Quadro 3), o que ressalta a importância da fração coloidal na reserva do nutriente (Simard et al., 1992).

Mesmo com maiores teores de K no horizonte O, a reserva total de K (teores totais extraídos com HF e HNO₃ concentrados) em todos os perfis foi muito reduzida (K total inferior a 200 mg kg⁻¹), mesmo quando comparada com outros solos altamente intemperizados dos trópicos úmidos. Vários autores estimaram os teores de K total em Latossolos e Ultissolos, os quais oscilaram entre 300 e 2000 mg kg⁻¹ (Loganathan et al. 1995; Silva et al., 2000). Melo et al. (2003) também encontraram maiores teores totais de K de Latossolos desenvolvidos de arenito da Formação Adamantina no Triângulo Mineiro (354 a 1717 mg kg⁻¹), o que evidencia a maior pobreza do arenito Ponta Grossa, rocha de origem dos solos em estudo, em minerais primários fontes do nutriente. Os baixos teores de K total (Quadro3) foram coerentes com as discretas reflexões de minerais micáceos por DRX nas frações areia e silte (Figura 1) e argila sem tratamento (Figura 2A).

Os teores de K⁺ trocáveis oscilaram entre 2 a 24 mg kg⁻¹ nos horizontes minerais, com a grande maioria dos horizontes apresentando teores inferiores a 3 mg kg⁻¹ (Quadro3). Essa reduzida disponibilidade de K para as plantas resultou em altos valores para relação (R) entre teores totais/trocáveis nos horizontes A1, A2, AB, B1 e B2. Apenas no horizonte O os valores de R foram mais próximos de 1,0 (1,5 a 2,0), o que indica alta solubilidade e facilidade de extração do K⁺ nas acículas acumuladas sobre o solo. Apenas uma pequena fração do K se encontra adsorvida a compostos protéicos, o que torna o elemento altamente solúvel e de fácil lavagem nas acículas e no horizonte O (Osono e Takeda, 2004). Em relação aos horizontes minerais houve tendência dos valores de R aumentarem em profundidade (R máximo de 101 no horizonte BA do perfil 1); os minerais micáceos devem estar mais preservados nos horizontes mais profundos dos perfis de solo.

Os teores de K extraídos com soluções crescentes de HNO_3 fervente também foram baixos (máximo de 91 mg kg^{-1}) (Figura 3) e similares aos obtidos em solos originados de rochas sedimentares no Rio Grande do Sul por Melo et al. (1995). Já em Cambissolo originado de granito, esses autores observaram teores mais elevados, chegando a 1522 mg kg^{-1} com HNO_3 4 mol L^{-1} . O aumento progressivo nos teores de K com o emprego de soluções mais concentradas de HNO_3 refletiu o efeito de acidificação do meio pela produção de H^+ , que ataca as estruturas de minerais, principalmente das micas. No perfil 3, por exemplo, a maior inclinação da curva de extração do horizonte B2 com HNO_3 (Figura 3) é consequência da maior taxa de liberação de K e pode indicar maior relação entre biotita/muscovita nas frações do solo.

Quadro 3. Teores trocáveis e totais de K dos solos

Perfil	Horizonte	Trocável	Total	R (total/troc.)
		----- mg kg^{-1} -----		
1	O	110,8	170,9	1,5
	A1	24,0	134,0	5,6
	A2	5,0	135,1	27,2
	BA	3,0	146,1	48,7
	B1	3,0	145,8	48,3
	B2	3,0	173,0	57,3
2	O	129,0	196,2	1,5
	A1	7,00	157,8	22,4
	A2	4,0	126,1	31,5
	BA	2,0	202,7	101,5
	B1	3,0	189,2	63,0
	B2	2,0	184,6	92,0
3	O	107,0	187,4	1,7
	A1	10,0	148,0	14,8
	A2	4,0	111,0	27,5
	BA	3,0	111,2	37,0
	B1	3,0	170,2	56,7
	B2	2,0	186,3	93,0
4	O	84,0	168,0	2,0
	A1	6,0	140,5	23,3
	A2	5,0	136,2	27,2
	BA	3,0	130,3	43,3
	B1	3,0	199,6	66,3
	B2	2,0	178,0	89,0
5	O	120,0	202,7	1,7
	A1	7,0	134,3	19,1
	A2	5,0	139,0	27,8
	BA	3,0	156,9	52,3
	B1	3,0	177,6	59,3
	B2	2,0	175,2	87,5

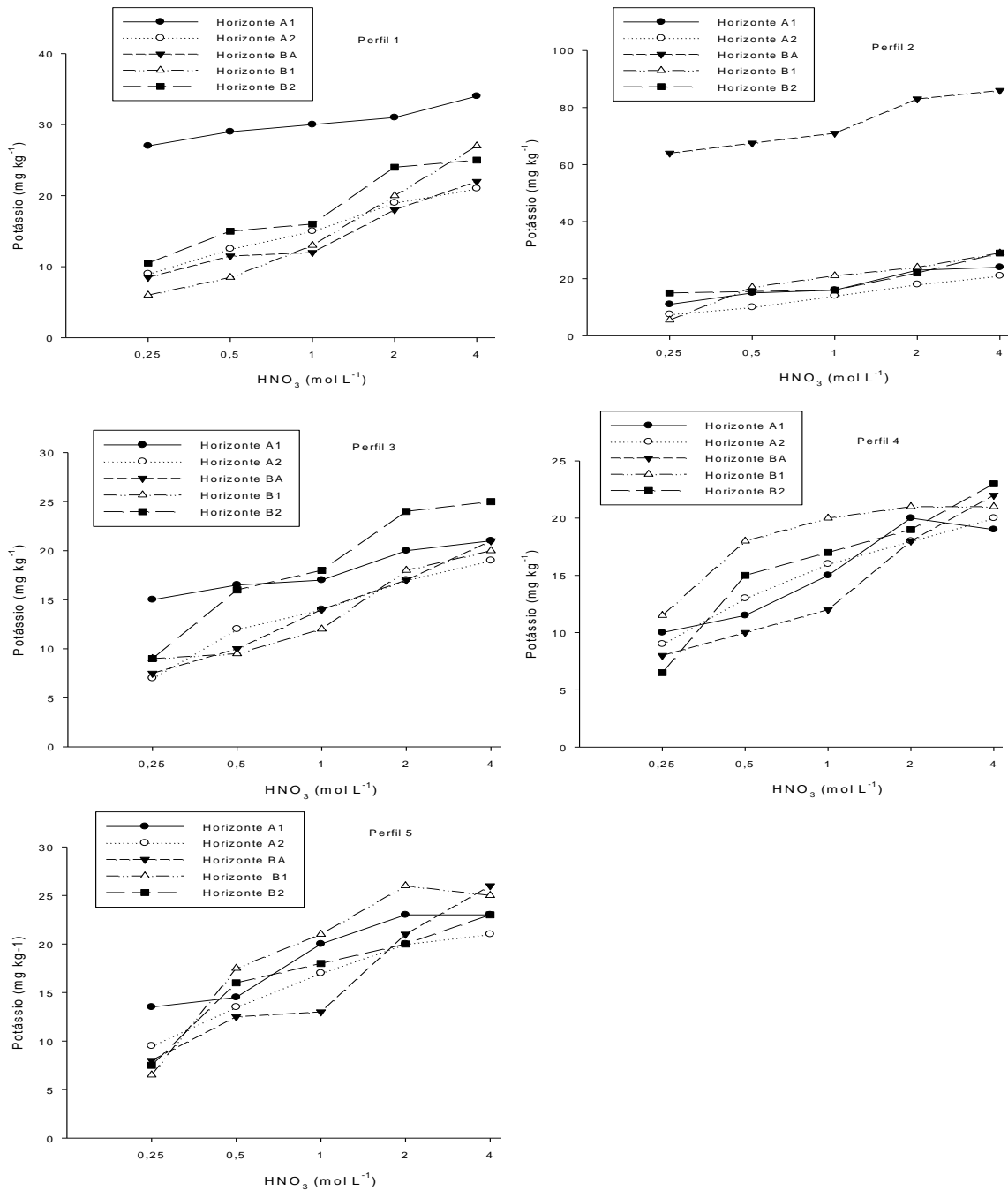


Figura 3. Teores de K nos horizontes A1, A2, BA, B1, B2 dos perfis de solos extraídos com diferentes concentrações de HNO₃ fervente: 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 mol L⁻¹.

3.4 Relação entre formas de K no solo e absorção do nutriente pelas árvores

Os teores de K nas acículas de todos os lançamentos (Quadro 1) estão abaixo do requeridos para o bom desenvolvimento das plantas, que segundo Switzer & Nelson (1972) é de 6,0 g kg⁻¹. Mesmo com teores de K baixo, as árvores não apresentaram sintomas visuais de deficiência do nutriente.

Comparando o teor e o conteúdo médios de K nas acículas (Quadro 1) entre as duas datas de coletas (junho e setembro de 2011) nota-se uma diminuição dos mesmos, tanto no primeiro como no segundo lançamentos de 2010 (1L10 e 2L10 comparados com 1L10R e 2L10R). Esse comportamento é resultado da translocação do K das acículas formadas em 2010 para o pendão (P11 – maior teor médio de 4,3 g kg⁻¹), que representou o crescimento no momento da amostragem em setembro de 2011.

Como, em média nos cinco perfis, 83% da massa de raiz encontravam-se nos três primeiros horizontes (massa total média de 54,9 g até horizonte B2) foram considerados apenas as correlações entre os teores de K no solo e os teores e conteúdo na planta nos horizontes O, A1 e A2 (Quadros 4 e 5).

Quadro 4. Coeficientes de correlação (r) entre teores de K extraídos do solo por diferentes métodos e os teores do nutriente em diferentes lançamentos das árvores (Quadro 1)⁽¹⁾

Hor.	Planta	Extratores						Total
		Trocável	Ácido nítrico (mol L ⁻¹)					
			AN 0,25	AN 0,5	AN 1	AN 2	AN 4	
O	2L09	-0,72	0,39	-0,04	-0,04	-0,07	0,07	-0,25
	1L10	-0,38	-0,16	-0,73	-0,79	-0,98 **	-0,88*	-0,58
	2L10	-0,20	0,37	-0,13	-0,22	-0,65	-0,66	-0,66
	1L10R	-0,23	-0,67	-0,66	-0,48	-0,64	-0,25	-0,52
	2L10R	0,44	0,49	0,36	0,20	-0,10	-0,41	-0,13
	P11	-0,90*	-0,06	-0,45	-0,24	-0,63	-0,06	-0,95*
A1	2L09	-0,31	-0,28	-0,40	-0,40	-0,65	-0,63	-0,17
	1L10	0,68	0,69	0,60	0,77	0,65	0,58	-0,92*
	2L10	0,97**	0,94*	0,92*	0,88*	0,81	0,82	-0,52
	1L10R	0,28	0,20	0,24	0,34	0,50	0,39	-0,34
	2L10R	0,89*	0,88*	0,94*	0,82	0,84	0,91*	-0,07
	P11	0,19	0,10	0,06	0,05	0,02	-0,03	-0,31
A2	2L09	0,01	-0,14	0,51	0,13	-0,45	-0,88*	-0,38
	1L10	0,88*	0,78	0,72	0,54	0,56	0,29	0,65
	2L10	0,38	0,23	0,23	-0,12	0,11	0,10	0,15
	1L10R	0,66	0,66	0,12	0,36	0,44	0,66	0,82
	2L10R	-0,13	-0,17	-0,29	-0,49	0,06	0,26	-0,16
	P11	0,48	0,29	0,33	0,13	-0,23	-0,24	0,27

⁽¹⁾ 2L09 - segundo lançamento de 2009; 1L10 e 2L10 - primeiro e segundo lançamentos de 2010; 1L10R e 2L10R - nova coleta após 3 meses do primeiro e segundo lançamentos de 2010; P11 - pendão de crescimento em 2011: devido ao reduzido tamanho das acículas no pendão não foi possível obter a massa de 100 acículas e o conteúdo de K; * e ** - valores de r significativos aos níveis de p<0,05 e p<0,01, respectivamente.

Quadro 5. Coeficientes de correlação (r) entre teores de K do solo extraídos por diferentes métodos e os conteúdos do nutriente em diferentes lançamentos das árvores (Quadro 1)⁽¹⁾

Hor	Planta	Extratores						Total
		Trocável	Ácido nítrico (mol L ⁻¹)					
		0,25	0,5	1,0	2,0	4,0		
O	2L09	-0,41	0,37	0,43	0,55	0,55	0,73	-0,00
	1L10	0,30	-0,55	-0,60	-0,77	-0,31	-0,58	0,53
	2L10	0,23	0,09	-0,13	-0,22	-0,52	-0,64	-0,35
	1L10R	0,30	-0,48	0,06	0,27	0,18	0,43	-0,04
	2L10R	0,72	0,09	0,21	0,05	-0,04	-0,39	0,17
A1	2L09	-0,65	-0,68	-0,69	-0,84	-0,90*	-0,85	0,54
	1L10	-0,14	-0,01	-0,09	0,19	0,12	0,04	-0,60
	2L10	0,94*	0,92*	0,95*	0,95*	0,99**	0,99**	-0,40
	1L10R	-0,04	-0,15	-0,00	-0,07	0,23	0,20	0,48
	2L10R	0,71	0,71	0,80	0,76	0,87	0,90*	-0,04
A2	2L09	-0,56	-0,63	-0,17	-0,33	-0,81	-0,86	-0,68
	1L10	0,55	0,70	0,59	0,83	0,89*	0,49	0,60
	2L10	0,34	0,30	-0,01	-0,10	0,39	0,55	0,34
	1L10R	-0,13	-0,03	-0,67	-0,26	0,02	0,61	0,29
	2L10R	-0,05	0,02	-0,35	-0,28	0,38	0,65	0,12

⁽¹⁾ 2L09 - segundo lançamento de 2009; 1L10 e 2L10 - primeiro e segundo lançamentos de 2010; 1L10R e 2L10R - nova coleta após 3 meses do primeiro e segundo lançamentos de 2010; P11 - pendão de crescimento em 2011: devido ao reduzido tamanho das acículas no pendão não foi possível obter a massa de 100 acículas e o conteúdo de K; * e ** - valores de r significativos aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

A senescência e translocação do K^+ das acículas mais velhas em direção aos lançamentos mais novos dificultam o estabelecimento direto de causa-efeito entre os teores do nutriente no solo e na planta. Essa dinâmica de K^+ na planta deve ter sido a principal razão pelo reduzido número de coeficientes de correlação (r) significativos entre os teores no solo e teores e conteúdos nas acículas (Quadros 4 e 5). O lançamento em plena formação no momento da última amostragem (pendão - setembro de 2011) apresentou os maiores teores de K^+ , fortemente influenciado por processos de translocação das acículas mais velhas, e os menores valores de r com as diferentes formas de K^+ no solo.

No horizonte O as correlações foram inexpressivas e aquelas significativas apresentaram relação inversa entre o K no solo e na planta. Os métodos de extração usados não foram desenvolvidos para camada de resíduos vegetais, depositada sobre o solo, o que limita a interpretação operacional das formas trocáveis e não trocáveis de K e suas correlações com a absorção pelas plantas. Devido a alta solubilidade do K associado às acículas (Osono e Takeda, 2004), torna-se difícil separar formas distintas do nutriente com os métodos de extração utilizados. Os menores teores de K obtidos nas maiores concentrações nítricas em

relação aos teores trocáveis devem ser devidos à solubilização de compostos orgânicos pelo HNO_3 , que possui alto poder oxidante, o que facilitaria a redistribuição do nutriente previamente extraído nesses compostos. Esse processo de readsorção ou redistribuição de elementos previamente extraídos tem sido relatado, por exemplo, em trabalhos envolvendo extrações sequenciais de metais pesados (Shan e Chen, 1993). No horizonte O observaram-se os menores valores de coeficiente de correlação entre os próprios métodos de extração de K^+ (Quadro 6).

Para o horizonte mineral A1 houve estreita relação entre algumas formas de K^+ no solo e a absorção e acúmulo do nutriente na planta (altos valores de r nos Quadros 4 e 5). As correlações entre os próprios métodos de extração de K nesse horizonte do solo foram expressivas (Quadro 6). Segundo Benipal e Pasricha (2002) as plantas absorvem primeiramente o K^+ da solução do solo, cuja concentração depende daquela mantida pelo K^+ trocável, adsorvido nos sítios de troca. Uma vez o K^+ trocável é esgotado, dá-se a liberação do K^+ contido nas entrecamadas dos argilominerais e acelera-se a intemperização dos minerais primários potássicos (tamponamento das formas disponíveis do nutriente). Dessa forma, as correlações positivas e significativas no horizonte A1 entre os teores de K no solo extraídos por diferentes concentrações de HNO_3 e o teor nas acículas das amostras 2L10 e 2L10R (Quadro 4) sugere a participação de formas não trocáveis do nutriente na nutrição das árvores. Outros autores verificaram expressiva contribuição de formas não trocáveis de K extraídas com HNO_3 na nutrição de plantas e a estreita associação entre K trocável e não trocável (Melo et al., 1995; Benipal e Pasricha, 2002; Martins et al., 2004).

Devido a maior estabilidade e menor participação no tamponamento de K^+ disponível no solo as correlações positivas entre os teores totais do nutriente no solo e os teores e conteúdos nas acículas foram baixas e não significativas (Quadros 4 e 5).

Quadro 6. Matriz de correlação (valores de r) entre teores de K obtidos por diferentes métodos de extração nos solos⁽¹⁾

Hor.	Extratores						
	Trocável	Ácido nítrico (mol L ⁻¹)					
		0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	
O	0,25	-0,04					
	0,5	0,43	0,72				
	1,0	0,26	0,58	0,95*			
	2,0	0,52	0,28	0,83	0,83		
	4,0	0,03	0,05	0,58	0,77	0,79	
	Total	0,79	-0,15	0,29	0,14	0,63	0,17
	A1	0,25	0,99**				
0,5		0,99**	0,99**				
1,0		0,94*	0,97**	0,96*			
2,0		0,90*	0,89*	0,93*	0,95*		
4,0		0,93*	0,92*	0,96**	0,95*	0,99**	
Total		0,44	-0,51	-0,38	-0,62	-0,44	-0,36
A2		0,25	0,97**				
	0,5	0,81	0,74				
	1,0	0,84	0,90*	0,82			
	2,0	0,72	0,85	0,50	0,77		
	4,0	0,41	0,57	-0,08	0,34	0,78	
	Total	0,88*	0,95*	0,50	0,79	0,83	0,74

⁽¹⁾ * e ** - valores de r significativos aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

A limitada ocorrência de minerais micáceos (resíduos de muscovita e biotita) nas frações argila, silte e areia e os baixos teores de K total (inferiores a 200 mg kg⁻¹) foram coerentes com o intenso grau de intemperismo do Latossolo e a pobreza mineralógica do arenito de origem. Os maiores teores de formas de reserva de K no horizonte O foram atribuídos a passagem contínua do nutriente associado à fração mineral para formas orgânicas durante os 47 anos de cultivo de *Pinus* na área.

As correlações positivas e significativas entre os teores não trocáveis de K extraídos com HNO₃ fervente e os teores e conteúdo do nutriente nas árvores ajudam a explicar a falta de resposta do *Pinus* normalmente observada à fertilização potássica em solos altamente intemperizados e pobres em formas trocáveis de nutrientes.

Trabalhos específicos, em nível de rizosfera, devem ser realizados para avaliar a eficiência e entender os mecanismos das raízes dessa espécie em acelerar o intemperismo de minerais primários fontes de nutrientes em solos altamente intemperizados. Esses dados

ajudariam a responder a seguinte questão: qual o nível mínimo de reserva mineral de nutrientes dos solos para que as árvores de *Pinus* cresçam satisfatoriamente? Mesmo sendo muito pobre quimicamente, esse nível ainda não foi atingido para K na área em estudo.

5 LITERATURA CITADA

- BABEL, U. Gliederung und beschreibung des humusprofils in mitteleuropäischen Wäldern. *Geoderma*, 5:297-324, 1971.
- BENIPAL, D.S. & PASRICHA, N.S. Nonexchangeable K release and supplying power of Indo - Gangetic alluvial soils. *Geoderma*, 108:197-206, 2002.
- BLUM, W.E.H. & HILDEBRAND, E.E. Naerelementversorgung und wachstum von *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., auf zwei toposequenzen in Paraná/Suedbrasilien. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellschaft*, 25: 357-366, 1997.
- DEMMIG, B. & GIMMLER, H. Properties of the isolated intact chloroplast at cytoplasmatic K^+ concentrations. I - Light induced cation uptake into intact chloroplast is driven by an eletrical potential difference. *Plant Physiol.*, 73: 169-174, 1983.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Métodos de análise de solo. 2^o ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212p.
- EVANS, H.J. & SORGER, G.J. Role of mineral lements with emphasis on the univalent cations. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 17: 47-77, 1986.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5 M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Miner.*, 30: 401-408, 1982.
- KASEKER, J. F. Composição química de acículas, serapilheira, solos rizosféricos e não rizosféricos e variabilidade espacial em ensaio de omissão de nutrientes em *Pinus taeda* L. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2012. 95p. (Dissertação de Mestrado)
- LONGANATHAN, P.; DICKSON, A. A. & ISIRIMAH, N.O. Potassium supplying capacity of soils formed on different geological deposits in the Niger Delta region of Nigeria. *Geoderma*, 65: 109-120, 1995.
- MARTINS, R.; MELO, V.F. & MONTE SERRAT, B. Métodos de determinação da disponibilidade de potássio para a cultura do trigo em solos dos Campos Gerais, estado do Paraná. *Revista Ceres*, 51: 787-801, 2004.
- MELO, V. F.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; NOVAIS, R. F. & FONTES, M. P. F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 19:165-171, 1995.
- MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; MASCHIO, P.A.; RIBEIRO, A.N. & LIMA, V.C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:807-819, 2003.

- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & FONTES, M.P.F. Potassium and magnesium in clay minerals of some Brazilian soil as indicated by a sequential extraction procedure. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 33:2203-2225, 2002.
- MENGEL, K. & ARNEKE, W.W. Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Physiol. Plantarum*, 54: 402-408, 1982.
- MENGEL, K. & HAEDER, H.E. Effect of potassium supply on the rate of phloem sap exudation and the composition of phloem sap of *Rizinus communis*. *Plant Physiol.*, 59: 282-248, 1977.
- OSONO, T. & TAKEDA, H. Potassium, calcium, and magnesium dynamics during litter decomposition in a cool temperate forest. *J. Forest Resear.*, 9: 23-31, 2004.
- PAL, D.K.; SRIVASTAVA, P.; DURGE, S.L. & BHATTACHARYYA, T. Role of weathering of fine-grained micas in potassium management of Indian soils. *Applied Clay Sci.*, 20:39-52, 2001.
- PRATT, P.F. & MORSE, H.H. Potassium release from exchangeable and non exchangeable forms in Ohio soils. Ohio, Ohio Agricultural Experiment Station Research Bulletin, 1954. 747 p.
- RASCHE, R. Stomatal action. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 26: 309-340, 1975.
- SHAN, X. Q. & CHEN, B. Evaluation of sequential extraction for speciation of trace metals in model soil containing natural minerals and humic acid. *Anal. Chem.*, 65: 802-807, 1993.
- 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. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2065-2073, 2000.
- SIMARD, R.R.; KIMPE, C.R. & ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 1421-1428, 1992.
- SWITZER, G. L. & NELSON, L.E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 26: 143-147, 1972.
- WALLANDER, H & WICKMAN, T. Biotite and microcline as potassium sources in ectomycorrhizal and non-ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. *Mycorrhiza*, 9: 25-32, 1999.
- WISNIEWSKI, C. & REISSMANN, C. B. Deposição de serapilheira e de nutrientes em plantios de *Pinus taeda* L. na região de Ponta Grossa, PR. *Arq. Biol. Tecnol.*, 39: 435-442, 1996.