

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
NÍVEL MESTRADO**

FÁBIO STEINER

**FORMAS DE POTÁSSIO EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ E SUA
DISPONIBILIDADE PARA AS PLANTAS EM CULTIVOS SUCESSIVOS**

**MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO/2010**

FÁBIO STEINER

**FORMAS DE POTÁSSIO EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ E SUA
DISPONIBILIDADE PARA AS PLANTAS EM CULTIVOS SUCESSIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Nível Mestrado, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia Área de concentração Produção Vegetal.

ORIENTADORA: Profa. Dra. Maria do Carmo Lana (UNIOESTE).

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola (UEPG).

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO/2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca da UNIOESTE - Campus de Marechal Cândido Rondon - PR., Brasil)

S822f	<p>Steiner, Fábio</p> <p>Formas de potássio em solos do Estado do Paraná e sua disponibilidade para as plantas em cultivos sucessivos / Fábio Steiner. - Marechal Cândido Rondon, 2010. 87p.</p> <p>Orientadora : Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon, 2010.</p> <p>1.Potássio no solo. 2.Disponibilidade. 3.Extratores de potássio. 4.Poder tampão de potássio. 5.Fertilidade do solo.I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 21.ed. 631.83 CIP-NBR 12899</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio CRB-9/965



Unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná
 Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
 Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
 Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
 Marechal Cândido Rondon - PR.



Estado do Paraná

Ata da reunião da Comissão Julgadora da Defesa de Dissertação do Engenheiro Agrônomo **FÁBIO STEINER**. Aos quatro dias do mês de fevereiro de 2010, às 09:00 horas, sob a presidência da Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana, em sessão pública reuniu-se a Comissão Julgadora da defesa da Dissertação do Engenheiro Agrônomo Fábio Steiner, aluno do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Agronomia – Nível Mestrado e Doutorado com área de concentração em **"PRODUÇÃO VEGETAL"**, visando à obtenção do título de **"MESTRE EM AGRONOMIA"**, constituída pelos membros: Prof^a. Dr^a. Neyde Fabíola Balarezo Giarola (UEPG), Prof. Dr. Rubens Fey, Prof^a. Dr^a. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa e Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana (Orientadora).

Iniciados os trabalhos, o candidato apresentou seminário referente aos resultados obtidos e submeteu-se à defesa de sua Dissertação, intitulada: **"Formas de potássio em solos do estado do Paraná e sua disponibilidade para as plantas em cultivos sucessivos"**.

Terminada a defesa, procedeu-se ao julgamento dessa prova, cujo resultado foi o seguinte, observada a ordem de arguição:

Prof^a. Dr^a. Neyde Fabíola Balarezo Giarola.....Aprovado
 Prof. Dr. Rubens Fey.....Aprovado
 Prof^a. Dr^a. Mônica Sarolli Silva de Mendonça CostaAprovado
 Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana (Orientadora).....Aprovado

Apurados os resultados, verificou-se que o candidato foi habilitado, fazendo jus, portanto, ao título de **"MESTRE EM AGRONOMIA"**, área de concentração: **"PRODUÇÃO VEGETAL"**. Do que, para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos senhores membros da Comissão Julgadora.

Marechal Cândido Rondon, 04 de fevereiro de 2010.

Prof^a. Dr^a. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

Prof. Dr. Rubens Fey

Prof^a. Dr^a. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana (Orientadora)

*Deus não escolhe os capacitados,
“Ele” capacita os escolhidos.*

Anônimo

*“Aquilo que escuto, eu esqueço
Aquilo que vejo, eu lembro
Aquilo que faço, eu aprendo”.*

Confúcio

*“Aquilo que pensamos saber,
com frequência nos impede de aprender”.*

Claude Bernard.

Aos meus pais

Ivo e Maria

OFEREÇO

Aos meus irmãos

Elton e Graciela

Pela convivência e por tudo que em mim investiram.

OFEREÇO

Aos meus sobrinhos

Maykon e Thainara.

OFEREÇO

A minha filha

Jennifer Sabrina Cardoso Steiner

Pelo carinho e compreensão da ausência.

OFEREÇO

*A Joice Vieira da Silva, amor da minha vida,
esposa e parceira incondicional, que sempre me
deu apoio com carinho, amor e dedicação.*

DEDICO

*Oferecimento especial ao pequeno João Victor,
pelo sorriso encorajador, amor e estímulo para
superação de todas as dificuldades encontradas.*

O meu eterno amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

À professora Maria do Carmo Lana, pela orientação, amizade, clareza nos momentos de confusão e, sobretudo, pelo exemplo de dedicação ao ensino superior e a pesquisa.

À professora Neyde Fabiola Balarezo Giarola, pela co-orientação, amizade, ensinamentos transmitidos durante a graduação e pela possibilidade de realização deste trabalho, cujo apoio na seleção e classificação dos solos foram fundamentais para a realização deste trabalho.

A professora Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa e ao seu esposo professor Luiz Antônio de Mendonça Costa pela amizade, incentivo e conselhos, os meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Rubens Fey pelo convívio, amizade, incentivo e inestimáveis ensinamentos transmitidos durante este último ano.

Ao amigo Jucenei Fernando Frandoloso, pelo convívio, amizade e pela imprecedível ajuda com as análises laboratoriais.

Ao acadêmico e amigo Tiago Zoz pelo convívio, amizade e grande auxílio na condução deste e de outros experimentos.

Aos amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação, especialmente a Artur Soares Pinto Junior, João Alexandre Lopes Dranski, Marcelo Augusto Campagnolo, pelo convívio, amizade e aprendizado compartilhado durante estes dois anos de muito estudo e trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Unioeste, pelos ensinamentos transmitidos.

Ao Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) de Ponta Grossa, pela recepção e atendimento na coleta dos solos utilizados neste trabalho.

À CAPES pelo auxílio financeiro.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE e ao Núcleo de Estações Experimentais – NEE, pela estrutura concedida.

A todos que colaboraram de alguma forma, direta e indiretamente, para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE APÊNDICES	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO LITERATURA	18
2.1 FORMAS DE POTÁSSIO NO SOLO	18
2.1.1 Potássio total	19
2.1.2 Potássio estrutural	19
2.1.3 Potássio não-trocável	21
2.1.4 Potássio trocável	22
2.1.5 Potássio na solução do solo	24
2.2 FONTES NATURAIS DE POTÁSSIO EM SOLOS.....	25
2.3 FATORES QUE AFETAM A DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO NO SOLO	26
2.3.1 Poder tampão de potássio (PTK)	26
2.4 RESPOSTAS DAS PLANTAS À ADUBAÇÃO POTÁSSICA	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 AMOSTRAS DE SOLOS UTILIZADOS	30
3.2 PREPARO DOS SOLOS.....	33
3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	34

3.4 ANÁLISES QUÍMICAS.....	35
3.4.1 Extração e determinação das formas de potássio no solo.....	35
3.4.1.1 Determinação dos teores de potássio disponível	36
3.4.1.2 Determinação dos teores de potássio na solução	36
3.4.1.3 Determinação dos teores de potássio trocável	36
3.4.1.4 Determinação dos teores de potássio não-trocável	37
3.4.1.5 Determinação dos teores totais de potássio	37
3.4.2 Determinação do poder tampão de potássio (PTK) do solo	38
3.4.3 Análises de tecido vegetal.....	39
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 FORMAS DE POTÁSSIO NO SOLO	41
4.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO PELAS PLANTAS.....	60
CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
APÊNDICES	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Valores de K total, não-trocável, trocável e na solução, em alguns solos brasileiros e de outros países.....	20
TABELA 2. Classe de solo, material de origem e localização dos solos amostrados no Estado do Paraná.....	31
TABELA 3. Atributos químicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade	32
TABELA 4. Atributos físicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade	32
TABELA 5. Atributos mineralógicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade	33
TABELA 6. Tratos fitossanitários e culturas durante os seis cultivos realizados em casa de vegetação.....	35
TABELA 7. Formas de potássio e contribuição das diferentes formas para com o K total nas diferentes amostras de solos coletadas no Estado do Paraná	42
TABELA 8. Parâmetros de ajuste da equação da relação quantidade/intensidade, quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), potássio em equilíbrio (Ke) e poder tampão de potássio (PTK) nas diferentes amostras de solos coletadas no Estado do Paraná.....	45

TABELA 9. Coeficiente de correlação linear simples entre as várias características relacionadas com a disponibilidade de potássio nas amostras de solos coletadas no Estado do Paraná.....	46
TABELA 10. Teor de potássio total nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica	49
TABELA 11. Teor de potássio não-trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.....	51
TABELA 12. Teor de potássio disponível extraído pelo Mehlich-1 nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica	55
TABELA 13. Teor de potássio trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.....	57
TABELA 14. Teor de potássio na solução dos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.....	59
TABELA 15. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica	61
TABELA 16. Teor de potássio na matéria seca das plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) aplicação de potássio	63
TABELA 17. Conteúdo de potássio absorvido pelas plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) aplicação de potássio	65
TABELA 18. Teores de K trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos, quantidade total de potássio liberada e absorvida durante o experimento e contribuição da forma não-trocável com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.....	67

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.** Representação esquemática da dinâmica de disponibilidade do potássio no solo. .25
- FIGURA 2.** Representação da curva quantidade/intensidade (Q/I) para potássio.27
- FIGURA 3.** Produção de matéria seca acumulada nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica,.62
- FIGURA 4.** Potássio total absorvido em cada cultivo e acumulado na parte aérea das plantas nos diferentes solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.66

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1. Necessidade de corretivo e quantidade de corretivo aplicada nos diferentes solos amostrados no Estado do Paraná	83
APÊNDICE 2. Doses de potássio aplicada antes dos seis cultivos e total para elevar o nível de saturação de K na $CTC_{pH\ 7,0}$ a 6% para os diferentes solos amostrados no Estado do Paraná.....	84
APÊNDICE 3. Potássio adicionado (K_i), concentração de equilíbrio (K_f), quantidade adsorvida ou dessorvida (ΔK), raiz quadrada da atividade de Ca + Mg ($aCa + aMg$) ^{0,5} e quociente de atividade de potássio (QAK) para elaboração do relação qak versus ΔK (média de três repetições).....	85
APÊNDICE 4. Sintomas típicos de deficiência de potássio em folhas de feijão (cultivo 4) cultivado em Latossolo Vermelho eutrófico – (a), deficiência de potássio em soja (cultivo 5) cultivado em Latossolo Vermelho eutrófico – (b) e, deficiência de potássio em milho (cultivo 6) cultivado em Argissolo Vermelho distrófico – (c).	88
APÊNDICE 5. Desenvolvimento da cultura do feijão com (+K) e sem (-K) adição de fertilizante potássico em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico – (a) e, em Latossolo Vermelho eutroférico – (b).....	88
APÊNDICE 6. Desenvolvimento da cultura do milho com (+K) e sem (-K) adição de fertilizante potássico em Latossolo Vermelho eutroférico – (a) e, em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico – (b).	88
APÊNDICE 7. Mapa geológico do Estado do Paraná. Unidades estratigráficas.	89

RESUMO

FORMAS DE POTÁSSIO EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ E SUA DISPONIBILIDADE PARA AS PLANTAS EM CULTIVOS SUCESSIVOS

AUTOR: Fábio Steiner

ORIENTADORA: Maria do Carmo Lana (UNIOESTE)

CO-ORIENTADORA: Neyde Fabiola Balarezo Giarola (UEPG)

A absorção de K pelas plantas, em geral, é maior que a quantidade inicial de K trocável, indicando que formas não-trocáveis contribuem no suprimento deste nutriente às plantas. Assim, o presente trabalho teve como objetivos (a) determinar as formas de K total, K não-trocável, K trocável e K na solução do solo; (b) determinar o poder tampão de potássio dos solos; (c) avaliar a capacidade de suprimento de potássio nativo e adicionado a uma sucessão de cultivos; e (d) avaliar a contribuição das diferentes formas de potássio do solo no suprimento a uma sucessão de cultivos. Neste estudo foram conduzidos dois ensaios em casa de vegetação no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, PR, no período de outubro de 2008 a novembro de 2009. Amostras superficiais (0–20 cm) de 12 solos coletadas em diferentes regiões do Estado do Paraná, foram submetidas à adição ou não de fertilizante potássico (KCl) e a seis cultivos sucessivos (soja, milheto, trigo, feijão, soja e milho). As plantas foram cultivadas até aproximadamente 40 dias após a emergência, sendo determinada a produção de matéria seca e o teor de K. Nas amostras iniciais e naquelas coletadas após o segundo, quarto e sexto cultivo foram determinadas as formas de K total, não-trocável, trocável e na solução do solo. As formas de K do solo apresentaram grande amplitude de valores em função do material de origem e do grau de intemperismo do solo. A textura do solo influenciou o poder tampão de potássio (PTK) que apresentou valores entre 1,28 e 12,79 ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}/(\text{mmol L}^{-1})^{0,5}$). Os solos se diferenciaram na capacidade de suprimento de K aos cultivos, havendo uma contribuição importante de formas não trocáveis durante os seis cultivos que variou de 0 a 17,7% com adição de fertilizante potássico e de 44,1% a 72,9% sem adição de fertilizante potássico. Após o segundo cultivo os teores de K trocável mantiveram-se constantes com valores médios de 141 e 36 mg kg^{-1} , com e sem a adição de fertilizante potássico, respectivamente.

Palavras-Chave: Disponibilidade de potássio, capacidade de suprimento de potássio, poder tampão de potássio.

ABSTRACT

FORMS OF POTASSIUM IN SOILS OF THE STATE OF PARANA AND THEIR AVAILABILITY TO PLANTS IN SUCCESSIVE CROPS

AUTHOR: Fábio Steiner

ADVISER: Maria do Carmo Lana (UNIOESTE)

CO-ADVISER: Neyde Fabiola Balarezo Giarola (UEPG)

Potassium uptake by plants, in general, is greater than the initial amount of exchangeable K, indicating that non-exchangeable participate in supplying this nutrient to plants. Thus, this study aimed (a) determine the forms of K total, non-exchangeable K, exchangeable K and K in soil solution, (b) determine the buffering capacity of soil potassium, (c) evaluate the ability of potassium supply native and added to a succession of crops, and (d) evaluate the contribution of different forms of potassium in the soil to supply a succession of crops. In this study two experiments were conducted in a greenhouse at the Center for Agricultural Sciences, State University of West Parana, Marechal Cândido Rondon, PR, from october 2008 to november 2009. Surface samples (0-20 cm) of 12 soils collected from different regions of Parana State, were subjected to the addition or not of potassium fertilizer (KCl) and the six successive crops (soy, millet, wheat, beans, soybeans and corn). Plants were grown until approximately 40 days after emergence and determined the dry matter production and K content of In the initial samples and those collected after the second, fourth and sixth batch were certain forms of K total, non-exchangeable, exchangeable and soil solution. The forms of soil K showed a large range of values depending on the source material and the degree of weathering of the soil. Soil texture affected the buffering capacity of potassium (PTK), which presented values between 1.28 and 12.79 (mmolc kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{0.5}. The soils differed in the ability to supply K to the crops, with an important contribution of non-exchangeable forms in the six crops that ranged from 0 to 17.7% with addition of potassium fertilizer and 44.1% to 72.9% without the addition of potassium fertilizer. After the second crop contents of exchangeable K remained constant with average values of 141 and 36 mg kg⁻¹, with and without the addition of potassium fertilizer, respectively.

Key words: Potassium availability, potassium capacity to supply, buffering capacity of potassium.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é um nutriente de suma importância para o desenvolvimento das plantas, sendo depois do nitrogênio o nutriente mais absorvido pelas grandes culturas.

No solo, o K apresenta-se em diversas formas, com diferentes graus de disponibilidade e muitas das quais não-disponíveis às plantas. Em ordem decrescente de disponibilidade para as plantas, o K do solo pode ser distinguido em quatro formas: (1) K na solução do solo, que é a fração de K dissolvida na solução do solo, sob condições normais de umidade e livre das forças de adsorção (RAIJ, 1990); (2) K trocável; (3) K não-trocável; e (4) K total. O K trocável refere-se ao K fracamente retido na CTC do solo. O K não-trocável corresponde a uma fração do K estrutural que se dissolve facilmente em meio ácido e apresenta-se retido na estrutura de minerais, tais como feldspatos potássicos e micas, bem como o potássio “fixado” nas entrecamadas de argilominerais como a vermiculita e a esmectita (CURI, 2004). Existe certo equilíbrio entre essas formas de K no solo. A reserva mineral de K do solo é dividida, em função do tempo, em reserva de curto, médio e longo prazo. As formas de K, de disponibilidade de curto e médio prazo, estão em equilíbrio com o K da solução, de tal forma que, quando ocorre extração de K do solo, as plantas absorvem potássio da solução, o qual é tamponado pelas formas trocáveis, é repostado pelas formas não-trocáveis e estruturais (CURI et al., 2005). As formas não-trocável e estrutural de K são usualmente consideradas reservas de médio e longo prazo para as plantas (MELO et al., 2003; CURI, 2004).

Por representar uma reserva potencial de nutriente para as plantas, a fração de K não-trocável tem sido alvo de estudos. No entanto, são escassos os estudos sobre o assunto em

solos do Paraná. A estimativa da contribuição de diferentes formas de K às plantas tem sido feita em diversos estudos, nos quais foram utilizados cultivos sucessivos (MIELNICZUCK e SELBACH, 1978; PATELLA, 1980; ROSOLEM et al., 1988; SILVA e MEURER, 1988; NACHTIGALI e VAHL, 1991a; MEURER e ANGHINONI, 1993; ROSOLEM et al., 1993; LANA e NEVES, 1994; MELO, 1998; MOTERLE et al., 2005; KAMINSKI et al., 2007) e com o uso de extratores químicos (NACHTIGALL e VAHL, 1989; NACHTIGALL e VAHL, 1991b; MEURER et al., 1996; CASTILHOS e MEURER, 2002).

Para auxiliar a avaliação da disponibilidade de K para as plantas, é importante que se tenha conhecimento não só dos fatores quantidade (K trocável) e intensidade (K solução), mas também da relação entre esses dois fatores que constitui o poder tampão de potássio (PTK) do solo, ou seja, a capacidade que o solo tem em manter certa concentração de K na solução, quando da absorção pelas plantas ou de perdas ocorridas no solo (GOEDERT et al., 1975; MIELNICZUK, 1982). Informações neste sentido permitirão estabelecer não apenas a capacidade atual dos solos em suprir K para as plantas, mas também conhecer sua dinâmica no solo a médio e longo prazos, além de auxiliarem na tomada de decisão sobre o manejo da adubação potássica para os solos do Estado do Paraná.

Em vista da pouca informação sobre as formas e a capacidade de suprimento de potássio em solos do Estado do Paraná, o presente estudo teve como objetivos (a) determinar as formas de K total, K não-trocável, K trocável e K na solução do solo; (b) determinar o poder tampão de potássio dos solos; (c) avaliar a capacidade de suprimento de potássio nativo e adicionado a uma sucessão de cultivos; e (d) avaliar a contribuição das diferentes formas de potássio do solo no suprimento a uma sucessão de cultivos.

2 REVISÃO LITERATURA

2.1 FORMAS DE POTÁSSIO NO SOLO

O potássio (K) é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, podendo atingir concentrações de 300 a 30.000 mg kg⁻¹ (SPARKS, 2000), as quais são pouco menores nas regiões tropicais (900 a 19.000 mg kg⁻¹) (FASSBENDER, 1984). As rochas ígneas contêm as maiores concentrações de potássio: 46.000 e 54.000 mg kg⁻¹ nos granitos e sienitos, porém somente 7.000 mg kg⁻¹ no basalto. Nas rochas sedimentares pelíticas (argilitos, siltitos e folhelhos), a concentração de K é de aproximadamente 30.000 mg kg⁻¹, enquanto nos calcários é de apenas 6.000 g kg⁻¹ (ERNANI et al., 2007).

A maior parte do potássio do solo (98%) encontra-se na estrutura dos minerais primários e secundários (K estrutural), e só uma pequena fração encontra-se em formas mais prontamente disponíveis às plantas, seja ligado às cargas elétricas negativas (K trocável), seja na solução do solo (K solução) (SPARKS, 2000). A maneira com que o K se liga aos componentes sólidos do solo, assim como a energia dessas ligações, dá origem às várias formas de K no solo. Cada uma dessas formas mantém um equilíbrio específico com a solução do solo, razão por que afetam a disponibilidade de K aos vegetais com diferentes magnitudes (ERNANI et al., 2007), devido a esse equilíbrio dinâmico entre as formas de K no solo, extratores químicos específicos têm sido utilizados na sua quantificação (SPARKS, 1980), tendo como vantagem permitir a comparação das formas de K sob diferentes condições.

2.1.1 Potássio total

O K total representa o somatório de todas as formas de K determinado no solo, o qual pode variar muito de solo para solo (Tabela 1), principalmente de acordo com o material de origem, da composição mineralógica e do grau de intemperismo (MEURER e INDA JÚNIOR, 2004). O K total é determinado por meio do uso de ácido fluorídrico (HF) com posterior dissolução dos extratos com ácido clorídrico (HCl) 6,0 mol L⁻¹ (PRATT, 1965).

Silva et al. (2000); Dias et al. (2007); Diniz et al. (2007) e Morais et al. (2007) encontraram baixos teores de K total, ao trabalharem com solos em avançado estágio de intemperismo e/ou derivados de materiais de origem pobre em minerais primários fontes deste nutriente (basalto). Para Silva et al. (1995) essas baixas quantidades de K total são reflexos da dominância de óxidos de ferro e quartzo nas frações grosseiras e caulinita e gibbsita na fração argila. Dias et al. (2007) ainda complementam que nos solos altamente intemperizados, em virtude da ausência de minerais primários que são fontes de K, a forma trocável de K se torna a mais importante para nutrição das culturas.

Em solos poucos intemperizados com maior quantidade de minerais primários que contém K na sua estrutura, são encontrados altos teores de K total como evidenciado por Nachtigall e Vahl (1991a); Britzke et al. (2007) e Taiwo et al. (2009) (Tabela 1).

2.1.2 Potássio estrutural

O K contido nos minerais primários e/ou secundários (K estrutural) constitui quase a totalidade do elemento presente nos solos e representa a capacidade potencial de suprimento deste nutriente às plantas. Entretanto, o K somente é liberado para a solução do solo quando esses minerais são intemperizados. Como a intemperização é um processo lento, as quantidades liberadas por esse mecanismo são, na maioria dos solos, pequenas e insuficientes para suprir a demanda da planta, especialmente àquelas de ciclo curto (ERNANI et al., 2007).

Os minerais mais comuns relacionados como fontes de K estrutural são as micas e os feldspatos, com a seguinte seqüência, em ordem decrescente de facilidade de liberação de K: biotita, ortoclássio, microclínio e muscovita (SONG e HUANG, 1988).

TABELA 1. Valores de K total, não-trocável, trocável e na solução, em alguns solos brasileiros e de outros países

Estado	Solos	Concentração (mg kg ⁻¹)	Fonte
----- K total -----			
RS	44	2.600 a 39.500	Nachtigall e Vahl (1991a)
SP	6	885 a 63.262	Lana e Neves (1994)
PR	2	780 a 867	Silva et al. (1995)
PB	9	1.989 a 4.500	Chaves e Dias (1996)
MG	4	1.977 a 3.583	Silva et al. (2000)
RS	4	1.944 a 5.417	Castilhos et al. (2002)
MG	19	154 a 16.938	Melo et al. (2003)
MG	4	1.040 a 9.370	Villa et al. (2004)
Cerrado	5	144 a 2.037	Vilela et al. (2004)
MG	10	202 a 10.204	Melo et al. (2005)
RS	14	138 a 10.425	Britzke et al. (2007)
CE	4	235 a 2.815	Diniz et al. (2007)
MG	10	97 a 2.356	Morais et al. (2007)
Colômbia	8	9.020 a 23.320	Ramos et al. (2006)
Nigéria	17	5.545 a 40.537	Taiwo et al. (2009)
----- K não-trocável -----			
RS	44	21 a 955	Nachtigall e Vahl (1991a)
SP	6	34 a 3.062	Lana e Neves (1994)
PR	2	17 a 64	Silva et al. (1995)
PB	9	1.443 a 5.031	Chaves e Dias (1996)
MG	4	14 a 354	Silva et al. (2000)
RS	3	231 a 1.364	Castilhos et al. (2002)
MG	4	24 a 240	Villa et al. (2004)
MG	10	21 a 643	Melo et al. (2005)
RS	14	35 a 243	Britzke et al. (2007)
CE	4	70 a 958	Diniz et al. (2007)
MG	10	2 a 987	Morais et al. (2007)
SP	2	897 a 2.067	Werle et al. (2008)
Estados Unidos	1	20.000	Liu et al. (1997)
Colômbia	8	429 a 1.712	Ramos et al. (2006)
Nigéria	17	5.460 a 40.170	Taiwo et al. (2009)
----- K trocável -----			
RS	44	14 a 360	Nachtigall e Vahl (1991a)
RS	11	38 a 192	Meurer e Anghinoni (1993)
SP	6	17 a 49	Lana e Neves (1994)
PR	2	64 a 293	Silva et al. (1995)
PB	9	234 a 1.560	Chaves e Dias (1996)
MG	4	199 a 637	Silva et al. (2000)
RS	4	12 a 44	Castilhos et al. (2002)
MG	4	24 a 116	Villa et al. (2004)
Cerrado	5	27 a 78	Vilela et al. (2004)
MG	10	13 a 90	Morais et al. (2007)
Estados Unidos	1	200	Liu et al. (1997)
Colômbia	8	160 a 608	Ramos et al. (2006)
Nigéria	17	35 a 234	Taiwo et al. (2009)
----- K na solução -----			
RS	11	13 a 81	Nachtigall e Vahl (1989)
MG	4	93 a 409	Silva et al. (2000)
SP	1	4 a 28	Rosolem et al. (2003)
RS	14	10 a 55	Britzke et al. (2007)
MG	10	6 a 73	Morais et al. (2007)
Colômbia	8	82 a 226	Ramos et al. (2006)
Nigéria	17	4 a 35	Taiwo et al. (2009)

Em solos do Rio Grande do Sul, Kaminski et al. (2007) verificaram que o K estrutural foi pouco acessível às plantas em cinco cultivos sucessivos. Resultados similares também foram evidenciados por Moterle et al. (2005) em um Argissolo de Santa Maria (RS) após cinco cultivos e, por Dias et al. (2007) em um Latossolo de Londrina (PR), após quatro cultivos. Entretanto, a forma estrutural pode representar uma importante fonte de K para as espécies nativas e florestais, que têm exigências nutricionais a médio e a longo prazo.

2.1.3 Potássio não-trocável

O K não-trocável compreende parte do K estrutural que se dissolve mais facilmente em meio ácido em adição ao K fixado nas entrecamadas de minerais de argila do tipo 2:1, como a illita e a vermiculita (MIELNICZUK e SELBACH, 1978; SILVA et al., 1995). O K não-trocável é considerado o teor extraído do solo por uma solução de ácido nítrico (HNO_3) 1 mol L^{-1} fervente subtraído daquela fração extraída pelo acetato de amônio (K trocável) (KNUDSEN et al., 1986).

Em solos com predomínio de minerais de argila do tipo 1:1, os teores de K não-trocável muitas vezes se assemelham aos de K trocável (SILVA et al., 1995; SILVA et al., 2000; VILLA et al., 2004) (Tabela 1). Por outro lado, em solos com predomínio de argilas silicatadas do tipo 2:1 e mesmo em alguns com minerais do tipo 1:1, o K não-trocável é, de modo geral, maior que o K trocável (LANA e NEVES, 1994; CASTILHOS et al., 2002; MORAIS et al., 2007; TAIWO et al., 2009) (Tabela 1).

Em diversas situações, verifica-se, que a quantidade de potássio extraída pelas plantas, é superior às formas trocáveis, pelo que as formas de K não-trocável contribuem significativamente para o total de K absorvido pelas plantas, principalmente quando o K trocável é baixo (NACHTIGALL e VAHL, 1991b; SILVA et al., 1995) e em solos com teores substanciais de minerais do tipo 2:1 (COX et al., 1999). Com a exaustão das formas trocáveis, o K não-trocável, que representa a reserva de médio prazo, é lentamente liberado para o solo, podendo então ser absorvido pelas plantas, retidos na CTC, fixado, erodido ou lixiviado, o que deve ser levado em consideração no programa de adubação, principalmente de culturas perenes (MIELNICZUK, 1982).

Lana e Neves (1994), avaliando a capacidade de suprimento de K de seis solos de São Paulo observaram, após 4 cultivos sucessivos de eucalipto, que os teores de K não-trocável no solo reduziram, em média 55%. Os autores, ainda, evidenciaram que a

contribuição dessa forma de K do solo para as plantas de eucalipto variou de 34 a 110 kg ha⁻¹, o que, na média, representou 70% do K absorvido pelo eucalipto. Em solos do Rio Grande do Sul, Kaminski et al. (2007) verificaram que o teor de K não-trocável, após o quinto cultivo diminuiu em torno de 50%. Em contrapartida, Dias et al. (2007) avaliando as modificações das formas de K em um Latossolo Vermelho de Londrina, PR, submetido a cultivos sucessivos, observaram pequena diminuição das formas não-trocáveis de K, demonstrando que mesmo sendo um solo altamente intemperizado apresenta reservas, que podem ser disponibilizadas às plantas em cultivos sucessivos. Os autores ainda relatam que os teores de K total não modificaram com os cultivos de plantas no solo e concluíram que o cultivo sucessivo de plantas esgota lentamente as reservas de K no solo.

Morais et al. (2007) em solos de Minas Gerais encontraram baixos teores de K não-trocável, evidenciando a baixa capacidade de suprimento de K dos solos, a médio prazo. Os autores atribuíram esses resultados em virtude da ausência de minerais primários fontes de K. Segundo apontado por Oliveira (1970) estes dados evidenciam a depleção de K pelos cultivos em solos com alto grau de intemperismo. Fato semelhante não é observado em solos com menor grau de intemperismo, em que há maior resistência ao decréscimo do teor dessa forma de K por cultivos sucessivos (RASNAKE e THOMAS, 1976).

2.1.4 Potássio trocável

O potássio que se encontra ligado (ligações fracas e eletrostáticas) às cargas negativas nas superfícies das frações orgânicas e inorgânicas (minerais de argila silicatadas, óxidos e hidróxidos) do solo, pode ser definido como a forma trocável (ERNANI et al., 2007). É a fonte de maior interesse para a nutrição vegetal devido ao equilíbrio rápido que pode manter com o K da solução do solo (K solução).

O K trocável é extraído do solo com uma solução neutra (pH 7,0) de acetato de amônio 1 mol L⁻¹. O teor de K extraído por essa solução normalmente se assemelha àquela extraída por sais neutros, ácidos fracos, ou pela resina trocadora de íons (VILLA et al., 2004).

Segundo Havlin e Westfall (1985) o K trocável têm sido considerado um bom índice, em solos tropicais, para predizer a capacidade de suprimento de K dos solos com reserva disponível a curto prazo. Entretanto, essa forma de K do solo, responsável pela disponibilidade imediata para as plantas (não é capaz de manter a produtividade a médio ou a

longo prazo) havendo rápida queda na produção de matéria seca logo após o primeiro cultivo (Moterle et al., 2005; Dias et al., 2007; Kaminski et al., 2007; Fraga et al., 2009).

Nachtigall e Vahl (1991b), estudando a dinâmica de liberação de K em diferentes solos observaram que o K trocável tende a diminuir assintoticamente até níveis mínimos, que variam com o tipo de solo, a partir do qual a forma de K não-trocável passa a controlar a disponibilidade. Já Mielniczuk e Selbach (1978) destacam que a depleção de potássio no solo cultivado é concomitante para as formas trocável e não trocável, mesmo quando há adições periódicas de adubos potássicos. Silva et al. (1995) admitem que o suprimento de potássio às plantas não é exercido unicamente pelas formas prontamente disponíveis.

Patella (1980) cultivou trigo num solo originado de granito na região Sul do Rio Grande do Sul, durante 15 anos, removendo anualmente todos os resíduos vegetais e constatou que o teor de K trocável diminuiu muito pouco, revelando a alta capacidade desse solo em repor o K trocável a partir de K inicialmente não trocável. Resultados semelhantes foram encontrados por Bortoluzzi et al. (2005), os quais verificaram após 11 anos de experimento em um Argissolo, que os teores de K trocável, nas parcelas sem adubação potássica, mantiveram-se constantes, indicando que o solo alcançou um equilíbrio entre as formas de K trocável e não-trocável com um mínimo de K^+ (em torno de 30 mg kg^{-1}) no sistema solo-planta. A manutenção desta situação por longos períodos pode diminuir os teores de K não-trocável e comprometer a reposição deste à solução do solo e o estabelecimento de plantas cultivadas.

Já Ernani et al. (2002) observaram em sete anos de experimento, que o teor de K trocável do solo diminuiu de 140 mg kg^{-1} no primeiro ano para 40 mg kg^{-1} no quinto ano e que após isso, os teores permaneceram constantes. Os autores atribuíram esses resultados ao efeito tamponante de formas não-trocáveis de K do solo, as quais liberaram K e com isso o teor de K trocável do solo permaneceram inalterados a partir do quinto ano de avaliação.

Kaminski et al. (2007) também evidenciaram que os teores de K trocável diminuíram, aproximadamente, 50% após o primeiro cultivo. Os autores atribuíram esses resultados ao grande acúmulo de K no tecido da parte aérea da aveia. Nos demais cultivos, o teor de K trocável permaneceu constante. Resultados semelhantes foram obtidos por Nachtigall e Vahl (1991b) e Melo (1998).

Estudos realizados, em diversos solos brasileiros, demonstram que o K trocável está estreitamente relacionado com o K total e o K não-trocável, conforme verificado por Crisóstomo e Castro (1970); Chaves e Dias (1996), em solos do nordeste, Braga (1972); Prezotti e Defelipo (1987); Villa et al. (2004), em solos de Minas Gerais, Mielniczuk e

Selbach (1978); Nachigall e Vahl (1989), em solos do Rio Grande do Sul. Nestes trabalhos foram constatados que os solos que possuem maiores teores de K trocável, suprimento a curto prazo, possuem também maiores teores de K não-trocável e total, suprimento a médio e a longo prazo, respectivamente (Tabela 1). Em contraposição, Morais et al. (2007) verificaram que o K trocável não apresentou correlação com a forma não-trocável. Sugerindo que apesar da quantidade trocável dar uma boa idéia da disponibilidade atual, não é indicativo do potencial natural do solo para repor este elemento no médio prazo no complexo de troca catiônica (LEPSCH et al., 1978).

Estudo realizado por Villa et al. (2004) evidência que os maiores teores de K trocável e K na solução são encontrados em solos que apresentam CTC potencial mais elevada. Isso se deve em decorrência destes solos necessitarem de maior quantidade de K para atingir a mesma saturação por este nutriente no solo.

2.1.5 Potássio na solução do solo

A solução do solo é constituída pela água mais os elementos e compostos orgânicos nela dissolvidos. Apesar de ser o meio de onde as plantas absorvem os nutrientes, a solução da maioria dos solos agrícolas é bastante diluída (ERNANI et al., 2007). A concentração de K na solução do solo, necessária para o crescimento vegetal, varia consideravelmente com a espécie e com o estágio de crescimento das plantas. O teor do íon potássio (K^+) na solução do solo pode variar desde 1 mg L^{-1} de solução até 50 ou mais mg L^{-1} em solos bem supridos do nutriente ou recentemente fertilizados (MEURER e INDA JUNIOR, 2004), e por isso, a quantidade de K nesse meio pode esgotar-se em poucas horas ou em alguns dias, caso não fosse efetuada a reposição pela fase sólida (ERNANI et al., 2007).

A reposição do K na solução do solo é feita pelas diversas formas de K no solo já descritas, mas principalmete, pelo K trocável (MIELNICZUK, 1977) (Figura 1). À medida que o K é retirado da solução do solo, absorvido ou lixiviado, é reabastecido pelo K trocável adsorvido com baixa energia nas superfícies dos colóides. A dessorção do K estrutural contido no interior dos argilominerais depende, além da baixa concentração de K nas demais frações, da expansão das argilas e da difusão do elemento à superfície externa.

O K na solução pode ser extraído diretamente da solução do solo ou determinado com uma solução de cloreto de cálcio $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ (MIELNICZUK, 1978).

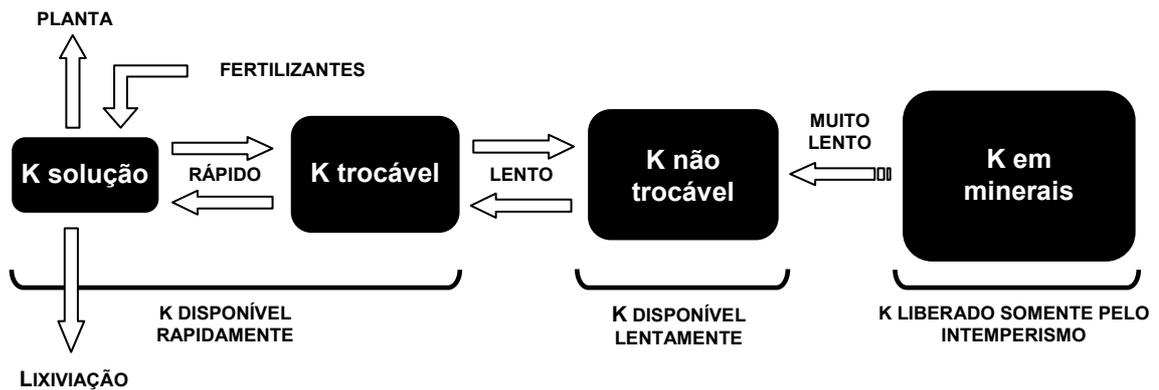


FIGURA 1. Representação esquemática da dinâmica de disponibilidade do potássio no solo.

O K na solução representa uma pequena participação em relação ao K total do solo (Tabela 1), e a sua avaliação apenas demonstra a disponibilidade momentânea de K para as plantas (TISDALE e NELSON, 1993). Contudo, sua importância pode às vezes ser significativa, visto que, em determinadas situações, o K da solução é o principal fator a influenciar a absorção deste nutriente pelas plantas (GIANELO e MIELNICZUK, 1981).

2.2 FONTES NATURAIS DE POTÁSSIO EM SOLOS

As reservas de potássio no solo são encontradas nos minerais primários, como feldspatos e micas, e nos minerais secundários, como illita, vermiculita e argilominerais interstratificados. Meurer e Inda Junior (2004) relatam que, em média, o teor de K nos minerais (mais especificamente na mica) é de 10%, enquanto na illita e na vermiculita está em torno de 6% a menos de 1%, respectivamente. Por sua vez, a caulinita já não possui mais K na sua estrutura.

A maioria dos solos brasileiros é constituída principalmente por Latossolos e Argissolos. Tais solos caracterizam-se por apresentar alto grau de alteração dos seus materiais constituintes, restando pouca ou nenhuma reserva mineral nas frações mais grossas, dominadas exclusivamente por quartzo e outros materiais resistentes ao intemperismo (ERNANI et al., 2007). Em alguns Latossolos, entretanto, alguma reserva de K pode ser encontrada na fração grossa, quando a muscovita está presente, porém teores importantes têm sido constatados nas frações silte e argila. Na fração argila, o K está provavelmente associado a argilominerais do tipo 2:1 com polímeros de hidróxi Al nas entrecamadas e também a

minerais interestratificados do tipo caulinita-vermiculita ou caulinita-esmectita (SILVA et al., 1995). Nos Argissolos, maiores conteúdos de K total têm sido identificados em solos desenvolvidos de rochas pelíticas, granitos, gnaisses e migmatitos, nas quais o conteúdo de minerais potássicos é mais elevado (NACHTIGALL e VAHL, 1989; MEURER et al., 1996).

Os solos de origem mais recente, incluindo Neossolos, Vertissolos, Luvisolos e Chernossolos, embora ocupem áreas menos expressivas do território brasileiro, podem apresentar maior reserva de nutrientes, graças à presença de teores expressivos de micas e feldspatos nas frações grossas, as quais podem representar importantes fontes de K (ERNANI et al., 2007).

2.3 FATORES QUE AFETAM A DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO NO SOLO

2.3.1 Poder tampão de potássio (PTK)

A disponibilidade de K para as plantas depende da quantidade de K trocável (fator quantidade - Q), do K em solução (fator intensidade - I) e da relação entre essas formas, que constitui o poder tampão de potássio (PTK) do solo. O PTK determina a capacidade dos solos em manter determinada concentração de K na solução quando da absorção pelas plantas ou de perdas ocorridas no solo (SILVA et al., 2000). A relação quantidade/intensidade (Q/I) foi desenvolvida por Beckett (1964), após confirmação da Lei da Relação estabelecida por Schoefield (1947), citado por Goedert et al. (1975), que introduziu o conceito de potencial químico como propriedade relacionada com a disponibilidade de nutrientes às plantas.

O conceito de quociente de atividade de K (QAK), dado pela relação de atividades entre K e Ca $[aK/(aCa)^{0.5}]$, é uma medida do potencial químico do K em relação ao do cálcio presente na solução do solo (BECKETT, 1964). Segundo esse autor, a disponibilidade de K no solo ou sua troca pelo Ca depende do potencial de K e do potencial de Ca. Como o Ca e o Mg apresentam propriedades de troca muito semelhantes, eles podem ser considerados como sendo uma única espécie e, dessa maneira, o QAK pode ser calculado como $aK/(aCa + aMg)^{0.5}$ (BECKETT, 1964).

O termo quantidade em relação ao QAK é medido em termos de ΔK (BECKETT e NAFADY, 1967). Este termo representa a quantidade de K adsorvido ($+\Delta K$) ou dessorvido ($-\Delta K$) pelo solo quando em equilíbrio com soluções de diferentes QAK.

Estudando solos de Oxford, Beckett (1964) verificou que a tendência da relação Q/I era similar: uma parte linear (superior) e uma na forma de curva assintótica (inferior) (Figura 2). Como a inclinação da porção linear representa o poder tampão de potássio (PTK) do solo, em concentrações baixas de K trocável, maiores valores serão obtidos mediante o aumento do coeficiente de seletividade, ou seja, maior retenção de K em relação ao Ca mais Mg (MIELNICZUK, 1978). A parte inferior da curva representa a quantidade total de K trocável no solo, sendo o K preferencial dado pela diferença entre os valores de ΔK correspondente à extremidade da região curva (parte azul) e à extrapolação da região reta do gráfico (Figura 2). O K planar, deste modo, é a diferença entre o K trocável total e o K preferencial (BECKETT e NAFADY, 1967; MIELNICZUK, 1978).

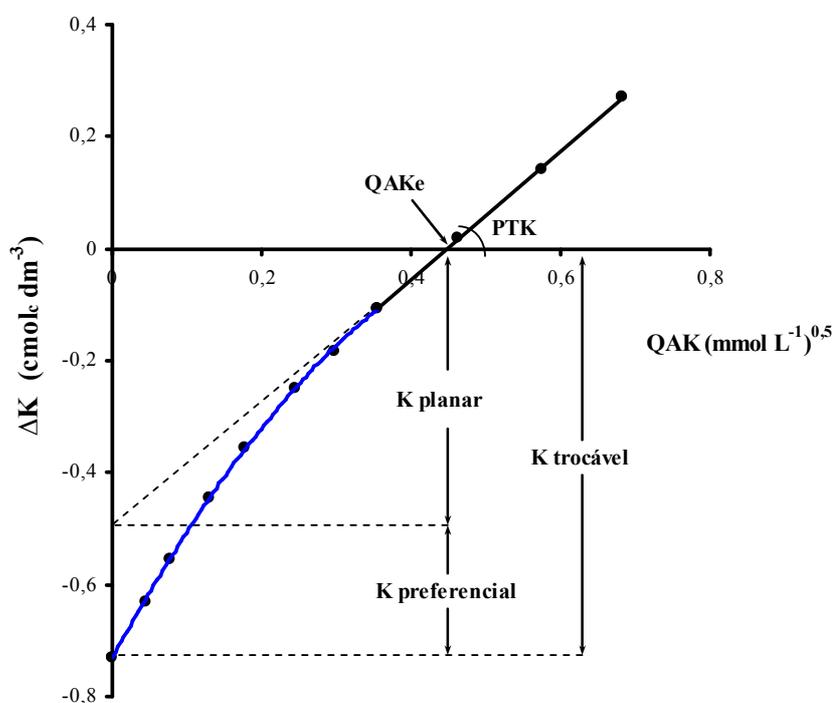


FIGURA 2. Representação da curva quantidade/intensidade (Q/I) para potássio.

Fonte: Adaptado de Mielniczuk (1978).

O conhecimento do teor de K trocável adsorvido na posição planar ou na posição preferencial é fundamental para avaliar os solos quanto à disponibilidade de K para as culturas. Segundo Chaves e Kinjo (1987), tomando por base apenas os teores de K trocável determinados pelos métodos tradicionais, quanto maior o teor de K trocável no solo, mais K será mantido na solução do solo. No entanto, tal afirmação nem sempre será verdadeira, considerando a posição em que se encontra o K sujeito a equilíbrio.

As medidas obtidas por meio da curva Q/I são muito variáveis de acordo com as características físico-químicas e mineralógicas dos solos. A composição do complexo sortivo ou tipo de argila predominante é que vai determinar se o K vai ser mais ou menos facilmente liberado para a solução.

O menor PTK de um solo é conferido pelos teores mais baixos de K trocável e de K em solução, que se encontram em equilíbrio dinâmico, conforme constatado por Villa et al. (2004). Portanto, as adubações potássicas para esses solos deverão ser feitas em doses menores e mais freqüentes, de forma a minimizar as perdas de K por lixiviação e, até mesmo, o consumo de luxo pelas plantas. Já para os solos que apresentam um maior PTK, as adubações poderão ser feitas em doses maiores e mais espaçadas, visto que possui maior capacidade de manter a atividade de K em solução. Meurer e Anghinoni (1994) ainda relatam que o aumento do poder tampão reduz a difusão efetiva do potássio no solo, e conseqüentemente diminuindo as perdas por percolação.

No manejo da adubação potássica é essencial considerar os valores de PTK, uma vez que o tamponamento do potássio no solo é importante para a manutenção da concentração do nutriente junto às raízes. Gianello e Mielniczuk (1981) verificaram que o PTK foi o segundo fator que mais influenciou a absorção de K pelo milho em solos do Rio Grande do Sul, só superado pela concentração de K na solução do solo.

2.4 RESPOSTAS DAS PLANTAS À ADUBAÇÃO POTÁSSICA

O incremento na produtividade agrícola decorrente da adição de fertilizantes potássicos ao solo varia principalmente com a quantidade de K disponível no solo, com as espécies vegetais, com o teor de água e com o nível geral da fertilidade do solo.

Nos solos tropicais com predomínio de minerais de argila do tipo 1:1, pequena parte do K aplicado vai para a solução do solo e o restante migra para o complexo de troca sendo adsorvido às cargas elétricas negativas (ligações eletrostáticas). Em solos onde existe um teor considerável de minerais do tipo 2:1 e concomitadamente valores elevados de pH, pode haver fixação de K nas entrecamadas desses minerais, porém, esse fenômeno é pouco expressivo nos solos brasileiros (ERNANI et al., 2007). A dinâmica do K adicionado pelos fertilizantes aos solos brasileiros é, portanto, bastante simples. A única perda de K a partir do solo acontece por lixiviação.

As plantas respondem significativamente a adubação potássica quando os teores no solo são inferiores a 80 mg dm^{-3} (MEURER e INDA JÚNIOR, 2004). Rheinheimer et al. (2001) em levantamento realizado no Estado do Rio Grande do Sul sobre a fertilidade do solo, observaram que aproximadamente 73% das amostras apresentam teores de K no solo superiores a 80 mg dm^{-3} . Em trabalhos realizados na região Sul do Brasil têm-se encontrado baixas respostas das culturas à adição de fertilizantes potássicos (BORKERT et al., 1993; SCHERER, 1998; BRUNETTO et al., 2005), mesmo em solos com teor de K trocável considerado médio ou baixo (VEDUIN, 1994). Isso tem sido atribuído à contribuição de formas de K não-trocáveis (SILVA et al., 1995; MEURER et al., 1996; MELO et al., 2004b), pois, como os mecanismos que controlam a absorção de K nas plantas superiores são eficientes, principalmente em baixas concentrações na solução do solo, resulta em forte gradiente químico em direção à rizosfera (GOMMERS et al., 2005), criando um ambiente favorável à liberação do K de formas não-trocáveis. Por isso, o suprimento é tamponado pelas formas de K trocáveis, adsorvidas com baixa energia em ligação nos sítios de troca, e pelas formas de K não-trocáveis, adsorvidas com alta energia de ligação nos sítios de troca, contidas nas entrecamadas dos argilominerais ou em minerais primários. No entanto, essa situação pode comprometer a preservação dessas formas no solo, provocando, inclusive, alterações em fases de minerais que contêm K, como observado por Bortoluzzi et al. (2005). É importante compreender a dinâmica da disponibilidade de K para poder planejar programas de adubação.

Kaminski et al. (2007) verificaram que o acúmulo de K na parte aérea das plantas, nos cinco cultivos, aumentou de forma quadrática com a aplicação das doses de K. Isso ocorre porque as plantas, em geral, possuem mais de um mecanismo de absorção de K, inclusive para teores mais altos no solo. Por isso, elas absorvem quantidades acima da sua necessidade metabólica, que é acumulada em organelas da célula vegetal, caracterizando o consumo de luxo, como relatado por Marschner (1998) e Gommers et al. (2005). Como consequência dessa maior extração pelas plantas também têm-se observado maiores reduções de K no solo, conforme constatado por Silva et al. (1995) e Kaminski et al. (2005).

O uso de fertilizantes potássicos com o objetivo de aumentar a reserva do K no solo, independentemente da forma com que possa acumular, não se justifica plenamente, pois também há depleção dessas formas para suprir a absorção de luxo pelas plantas. Assim, o suprimento de K parece ser mais dependente das características do próprio solo do que do histórico de adições de fertilizantes potássicos, conforme apontado por Kaminski et al. (2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi composto por dois ensaios conduzidos em casa de vegetação no Núcleo de Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), no município de Marechal Cândido Rondon, PR, no período de outubro de 2008 a novembro de 2009, com amostras de solos de diferentes regiões do Estado do Paraná representativas de áreas de produção de grãos do estado. As análises laboratoriais dos ensaios foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo e de Nutrição Mineral de Plantas e no Laboratório de Física de Solo do Centro de Ciências Agrárias da UNIOESTE.

3.1 AMOSTRAS DE SOLOS UTILIZADOS

A seleção dos locais para amostragem foi definida com base nas diferenças entre os materiais de origem dos solos, contemplando diferentes grupos geológicos ocorrentes no Estado do Paraná: Grupo Bauru, Grupo São Bento e Grupo Paraná (Tabela 2). O número de solos em cada grupo foi definido de acordo com a representação espacial das litologias, sendo as amostras do Grupo São Bento tomadas em maior número.

Para avaliar os teores de K totais e não-trocáveis em relação ao grau de intemperismo, na Formação Serra Geral (basalto), Formação Caiuá (arenito), Formação Ponta Grossa (folhelho) e Formação Furnas (arenito), selecionaram-se diferentes classes de solos (Latossolo, Nitossolo, Argissolo, Neossolo, Plintossolo, Gleissolo e Cambissolo) (Tabela 2).

As coletas contemplaram um total de 12 amostras de solos. Cada uma das amostras constituiu-se de aproximadamente 120 kg de solo da camada superficial (0-20 cm). Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, homogeneizadas e passadas em peneira com malha de 10,0 mm de abertura e acondicionadas em sacos plásticos, etiquetadas e armazenadas em casa de vegetação até a instalação do experimento.

Uma subamostra de cada solo assim preparado (cerca de 3 kg) foi retirada e moída em moedor específico para solo e passada em peneira de malha de 2,0 mm de abertura, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) para posterior análises químicas (Tabela 3), físicas (Tabela 4) e mineralógicas (Tabela 5), segundo metodologias descritas pelo Iapar (1992) e Embrapa (1997).

TABELA 2. Classe de solo, material de origem e localização dos solos amostrados no Estado do Paraná

Amostra	Classe ⁽¹⁾	Descrição ⁽¹⁾	Local/Município	Grupo ⁽²⁾ geológico	Formação ⁽²⁾ geológica	Litologia ⁽²⁾
1	LVef	Latossolo Vermelho eutrófico	Marechal Cândido Rondon	São Bento	Serra Geral ⁽³⁾	Basalto
2	LVd	Latossolo Vermelho distrófico	Ponta Grossa	Paraná	Ponta Grossa ⁽⁴⁾	Folhelho
3	LVAe	Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico	Umuarama	Bauru	Caiuá ⁽⁵⁾	Arenito
4	LVAd	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	Ponta Grossa	Paraná	Furnas ⁽⁶⁾	Arenito
5	NVef	Nitossolo Vermelho eutrófico	Marechal Cândido Rondon	São Bento	Serra Geral ⁽³⁾	Basalto
6	NVe	Nitossolo Vermelho eutrófico	Ponta Grossa	Paraná	Ponta Grossa ⁽⁴⁾	Folhelho
7	PVAd	Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico	Umuarama	Bauru	Caiuá ⁽⁵⁾	Arenito
8	PVAe	Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	Mercedes	São Bento	Serra Geral ⁽³⁾	Basalto
9	RRe	Neossolo Regolítico eutrófico	Marechal Cândido Rondon	São Bento	Serra Geral ⁽³⁾	Basalto
10	FX	Plintossolo Háptico	Ponta Grossa	Paraná	Ponta Grossa ⁽⁴⁾	Folhelho
11	GX	Gleissolo Háptico	Marechal Cândido Rondon	São Bento	Serra Geral	Sedimentos aluviais
12	CX	Cambissolo Háptico	Ponta Grossa	Paraná	Furnas ⁽⁶⁾	Arenito

⁽¹⁾ Classificação Brasileira segundo EMBRAPA (2006). ⁽²⁾ MINEROPAR (2009). ⁽³⁾ Derrames de basalto. Entre dois derrames consecutivos, geralmente há intercalações de material sedimentar – arenitos e siltitos – ditos intrapianos. Representados por basalto amigdaloidal de base, basalto compacto, basalto amigdaloidal, basalto vesicular e brecha basáltica e/ou sedimentar. ⁽⁴⁾ Folhelhos e siltitos cinza escuros, muito micáceos, laminados, com arenitos intercalados. ⁽⁵⁾ Depósitos sedimentares continentais constituídos predominantemente por arenitos médios à finos, quartzosos, com feldspato, calcedônia e opacos, com tendência para apresentar termos mais finos na porção inferior do pacote, e termos mais grossos nas porções superiores. Os arenitos apresentam-se cimentados por pequenas quantidades de hidróxidos de ferro e argila, podendo ocasionalmente apresentar intensa cimentação por sílica, originando variedades duras e resistentes. A maior parte das áreas de ocorrência do Arenito Caiuá apresenta-se coberto por espessura variável (até duas dezenas de metros) de coluviões arenosos e arenos-argilosos de idade quaternária. ⁽⁶⁾ Arenitos brancos, de granulação média a grossa, micáceos, feldspáticos, de matriz caulínica e estratificação cruzada com níveis conglomeráticos.

TABELA 3. Atributos químicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade

Solo	pH (CaCl ₂)	Matéria orgânica g dm ⁻³	P extraível (Mehlich-1) mg dm ⁻³	Cation trocável				CTC _{pH 7,0}	V	K na CTC _{pH 7,0} %
				K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺			
LVEf	4,6	13,2	9,1	0,38	3,07	1,77	0,55	14,92	34,99	2,55
LVd ⁽¹⁾	3,8	12,4	2,2	0,18	2,65	0,63	0,75	14,06	24,61	1,28
LVAe	4,9	11,8	15,4	0,16	3,90	2,22	0,20	12,89	64,24	1,24
LVAd ⁽¹⁾	4,2	17,1	13,1	0,16	2,97	0,98	0,45	13,11	31,35	1,22
NVEf	5,2	19,0	7,6	0,30	5,56	1,87	0,15	15,69	49,27	1,91
NVe ⁽¹⁾	3,9	24,3	9,8	0,21	2,28	0,62	1,10	16,07	19,35	1,31
PVAd ⁽¹⁾	5,2	5,3	20,3	0,15	2,13	0,45	0,15	6,41	42,59	2,34
PVAe ⁽¹⁾	3,7	16,8	10,7	0,34	6,12	1,73	3,35	16,64	49,22	2,04
RRe	5,1	9,1	11,8	0,37	5,92	2,32	0,15	15,30	56,27	2,42
FX ⁽¹⁾	3,8	18,1	3,1	0,19	1,15	0,37	1,20	14,16	12,08	1,34
GX ⁽¹⁾	3,6	12,0	2,8	0,12	4,43	1,36	3,50	17,51	33,75	0,69
CX ⁽¹⁾	5,2	9,4	9,5	0,26	2,75	1,18	0,10	9,95	42,11	2,61

pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ – relação solo:solução 1:2,5; Matéria orgânica – método Walkley e Black; P e K extrator Mehlich-1; Ca, Mg e Al extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽¹⁾ Solos sem histórico de adubação. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

TABELA 4. Atributos físicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade

Solo	Granulometria ⁽¹⁾			Textura ⁽²⁾	Ds ⁽³⁾	Dp ⁽⁴⁾	θ _{cc} ⁽⁵⁾
	Areia	Silte	Argila				
	g kg ⁻¹				kg dm ⁻³		dm ³ kg ⁻¹
LVEf	88,4	9,2	902,4	Muito argilosa	1,05	2,31	0,386
LVd	86,6	127,0	786,4	Muito argilosa	0,94	2,33	0,262
LVAe	689,4	58,2	252,4	Média	1,21	2,69	0,314
LVAd	677,4	6,2	316,4	Média	1,30	2,68	0,206
NVEf	240,8	206,8	552,4	Argilosa	1,05	2,44	0,406
NVe	81,0	136,2	782,8	Muito argilosa	0,92	2,42	0,450
PVAd	893,6	20,0	86,4	Arenosa	1,52	2,69	0,204
PVAe	155,0	142,6	702,4	Muito argilosa	1,09	2,62	0,318
RRe	181,8	182,8	635,4	Muito argilosa	1,11	2,63	0,420
FX	213,8	169,8	616,4	Muito argilosa	0,94	2,65	0,250
GX	106,2	441,4	452,4	Argilosa	1,16	2,43	0,256
CX	757,6	9,4	233,0	Média	1,21	2,62	0,254

⁽¹⁾ Método do densímetro segundo EMBRAPA (1997). ⁽²⁾ EMBRAPA (2006). ⁽³⁾ Ds: Densidade do solo – determinado pelo método da proveta segundo EMBRAPA (1997). ⁽⁴⁾ Dp: Densidade de partículas – determinada pelo método do balão volumétrico, com emprego de álcool etílico segundo EMBRAPA (1997). ⁽⁵⁾ θ_{cc}: umidade volumétrica na capacidade de campo – determinado pelo método direto segundo Luchese et al. (2001). (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

TABELA 5. Atributos mineralógicos dos solos amostrados no Estado do Paraná coletados na camada 0-20 cm de profundidade

Solo	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Ki ⁽¹⁾	Kr ⁽²⁾
LVef	234	198	223	394	1,3	1,79	1,14
LVd	101	97	264	101	0,1	0,65	0,53
LVAe	65	38	75	107	0,3	1,47	1,12
LVAd	41	33	109	44	0,1	0,64	0,54
NVef	209	169	179	437	1,9	1,98	1,24
NVe	117	78	220	114	0,1	0,90	0,74
PVAd	18	24	28	67	0,1	1,11	0,71
PVAe	206	162	197	34	0,4	1,78	1,16
RRe	221	196	153	289	3,7	2,46	1,35
FX	114	103	289	120	0,2	0,67	0,55
GX	161	66	83	345	0,1	3,29	2,19
CX	43	25	137	49	0,1	0,54	0,48

SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂ e MnO: teores de sílica, ferro, alumínio, titânio e manganês extraídos pelo ataque sulfúrico segundo EMBRAPA (1997). ⁽¹⁾ Ki: índice de intemperização – determinado pela relação molecular SiO₂/Al₂O₃ segundo EMBRAPA (1997). (Ki ≤ 2,46 indica solos mais intemperizados e Ki > 2,46 indica solos menos intemperizados). ⁽²⁾ Kr: determinado pela relação molecular SiO₂/Al₂O₃+Fe₂O₃ segundo EMBRAPA (1997). (Kr > 0,75 indica solos cauliniticos e Kr ≤ 0,75 indica solos oxidicos). (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

3.2 PREPARO DOS SOLOS

A correção da acidez dos solos foi realizada com calcário dolomítico (CaO = 25%, MgO = 12% e PRNT = 85%) e a necessidade de corretivo foi definida segundo a metodologia da saturação por bases, para elevá-la a 70% para solos argilosos, 50% para os arenosos e 60% para os solos de textura média. As doses de corretivos aplicadas em cada solo são apresentadas no Apêndice 1. O corretivo foi incorporado ao solo com o uso de uma betoneira. Após a aplicação do calcário, dividiu-se o volume de solo coletado em cada local em sacos plásticos contendo 7,5 dm³ de solo e as amostras foram umedecidas até alcançar 70% da capacidade de campo, facilitando a reação de dissolução do calcário. Em seguida, os sacos plásticos foram fechados e mantidos incubados em casa de vegetação durante um período de 25 dias (18/10 a 12/11/2008). Semanalmente os sacos foram abertos e o solo revolvido para repor a umidade e promover as trocas gasosas no intuito de melhorar a reação de dissolução do calcário.

3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento constou de seis cultivos sucessivos e os tratamentos constituídos pelos 12 solos, os quais foram divididos em dois ensaios: o primeiro com adição de fertilização potássica (+K), e o segundo sem aplicação de fertilização potássica (-K). A adubação potássica foi realizada em dose equivalente para elevar o nível de saturação de K na $CTC_{pH\ 7,0}$ a 6%. As doses de potássio aplicado em cada solo nos seis cultivos são apresentados no Apêndice 2. O delineamento experimental utilizado nos dois ensaios foi o bifatorial de blocos casualizados (Fator A = 12 solos e Fator B = 6 cultivos ou subdivisões temporais), com quatro repetições.

Após o período de incubação com calcário, o solo contido nos sacos plásticos foi acondicionado em vasos de polietileno com capacidade de 8 dm^3 , onde foram realizados seis cultivos sucessivos com plantas. A sequência de cultivos realizados foi soja – *Glycine max* (cultivo 1), milho – *Pennisetum americanum* (cultivo 2), trigo – *Triticum aestivum* (cultivo 3), feijão – *Phaseolus vulgaris* (cultivo 4), soja – *Glycine max* (cultivo 5), milho – *Zea mayz* (cultivo 6). Antes da semeadura, as sementes foram tratadas com iprodione + thiran (Rovrin[®]) e inoculadas com rizóbium específico, quando se tratava de leguminosas. Quando observado ataque de lagartas ou pulgões nas plantas durante os cultivos, efetuou-se a aplicação de Lambda-cialotrina + Tiametoxam (Engeo Pleno[®]) e quando detectado a ocorrência de ácaros ou oídio foi efetuado a aplicação de Sulfur (Kumulus[®] DF). O período em que foi realizado cada cultivo e outras informações sobre o manejo e condução do experimento são apresentados na tabela 6.

Antes de cada cultivo, todos os vasos receberam solução nutritiva contendo 80 mg kg^{-1} de nitrogênio (na forma de NH_4NO_3), 120 mg kg^{-1} de fósforo (H_3PO_4), 15 mg kg^{-1} de enxofre (CaSO_4), 5 mg kg^{-1} de cobre (CuSO_4), 5 mg kg^{-1} de zinco (ZnSO_4), 1 mg kg^{-1} de molibdênio ($[\text{NH}_4]\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{ H}_2\text{O}$) e 2 mg kg^{-1} de boro (H_3BO_3). Antes do quarto cultivo também aplicou-se 15 mg kg^{-1} de magnésio (MgCO_3). Em todos os cultivos foi realizada adubação nitrogenada (NH_4NO_3) em cobertura. As aplicações de nitrogênio foram fracionadas em doses de 40 mg kg^{-1} , sendo realizadas aos 10 e 20 dias após a emergência das plantas.

Ao início de cada cultivo, o solo foi umedecido até atingir aproximadamente 80% da capacidade de campo, que foi mantida até o final do cultivo, com reposição diária de água. A colheita das plantas foi realizada aproximadamente aos 40 dias após a emergência, quando a velocidade do crescimento vegetativo diminuiu (Tabela 6).

TABELA 6. Tratos fitossanitários e culturas durante os seis cultivos realizados em casa de vegetação

Cultivo	Período	Espécie	Colheita	Número de plantas	Tratos fitossanitários
			DAE ⁽¹⁾		
1	12/11/08 a 28/12/08	Soja	42	3	1 aplicação de Kumulus® DF 2 aplicações de Engeo Pleno®
2	17/01/09 a 03/03/09	Milheto	43	15	-
3	20/04/09 a 08/06/09	Trigo	42	4	2 aplicações de Kumulus® DF 1 aplicação de Engeo Pleno®
4	14/07/09 a 25/08/09	Feijão	38	3	2 aplicações de Kumulus® DF
5	29/08/09 a 06/10/09	Soja	35	3	2 aplicações de Kumulus® DF 2 aplicações de Engeo Pleno®
6	10/10/09 a 21/11/09	Milho	37	4	-

⁽¹⁾ Dias após a emergência.

Na colheita, a parte aérea das plantas foi cortada rente à superfície do solo, acondicionada em sacos de papel, seca em estufa de circulação forçada de ar a $65\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ até peso constante, pesadas e trituradas em moinho tipo Willey e armazenadas para posteriores análises químicas.

Após cada cultivo, também foi coletada uma amostra de solo de cada vaso, a qual foi seca em estufa com circulação de ar forçado a $55\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, em média, por quatro dias. Em seguida as amostras foram moídas, passadas em peneira de malha de 2,0 mm de abertura e submetidas a análises químicas de rotina conforme metodologia descrita pelo Iapar (1992) e armazenadas para as posteriores análises das formas de potássio.

3.4 Análises Químicas

3.4.1 Extração e determinação das formas de potássio no solo

Nas amostras iniciais de solo e naquelas coletadas após o segundo, quarto e sexto cultivos, foram determinados o teor de K na solução, K trocável, K não-trocável e K total.

Após todos os cultivos foram determinados os teores de K disponível (Mehlich-1). Em todos os extratos a determinação do K foi realizada por fotometria de chama. Devido à falta de aparelhos e/ou de vidrarias adequadas algumas das metodologias foram modificadas e o procedimento analítico adotado neste estudo é descrito a seguir:

3.4.1.1 Determinação dos teores de potássio disponível

O teor de K disponível no solo foi determinado após a extração pela solução Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$). Este método é utilizado pelos laboratórios de análises de rotina do Estado do Paraná. O procedimento analítico está detalhado em Tedesco et al. (1995).

3.4.1.2 Determinação dos teores de potássio na solução

Para determinar a concentração de K na solução do solo, utilizou-se o método de equilíbrio com a solução de $\text{SrCl}_2 \text{ } 5 \text{ mmol L}^{-1}$ (MIELNICZUK, 1978), com modificações. Amostras de 2,5 g de TFSA de cada solo foram colocadas em tubos de polietileno e acrescidas de 25 mL de uma solução de equilíbrio de $\text{SrCl}_2 \text{ } 5 \text{ mmol L}^{-1}$. Os tubos foram agitados por 1 h em agitador mecânico horizontal, com cerca de 150 oscilações por minuto. Após um período de repouso de 2 h, a suspensão foi filtrada em papel de filtragem lenta tipo Whatman nº 42 e uma alíquota de 10 mL do sobrenadante foi retirada para a determinação do K. O procedimento analítico adotado neste estudo foi o mesmo descrito por Mielniczuk (1978), à exceção da centrifugação por 15 min, a qual foi substituída pela filtragem.

3.4.1.3 Determinação dos teores de potássio trocável

Para a determinação do teor de K trocável, utilizou-se o método proposto por Sanzonowicz e Mielniczuk (1985) com modificações. Amostras de 2,0 g de TFSA de cada solo foram colocadas em tubos de polietileno e acrescidas de 20 mL de solução de acetado de amônio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1 mol L^{-1} a pH 7,0. Os tubos foram mantidos em agitação por 15 min, em agitador horizontal à 120 rpm. Em seguida, a suspensão foi filtrada em papel filtro tipo

Whatman nº 42, e uma alíquota de 5 mL do sobrenadante foi tomada para a determinação do K. O procedimento analítico adotado neste estudo foi o mesmo descrito por Sanzonowicz e Mielniczuk (1985), à exceção da decantação por 12 h, a qual foi substituída pela filtração.

3.4.1.4 Determinação dos teores de potássio não-trocável

Para a determinação do teor de K não-trocável, utilizou-se o método proposto por Pratt e Morse (1957), citados por Knudsen et al. (1986) com adaptações. Devido à falta de béquer de teflon ou de cadinho de platina (Pt) e de banho de areia, neste estudo optou-se pela utilização de béquer de vidro de 80 mL e placa de aquecimento de aço inox de 150 x 150 mm. Amostras de 0,4 g de TFSA de cada solo foram colocadas em béquer de vidro e acrescidas de 20 mL de HNO_3 1 mol L^{-1} . Os béqueres parcialmente tampados com lâminas de alumínio foram distribuídos em placa aquecedora a 110 °C, permanecendo sob fervura por 15 min. Em seguida, o extrato foi filtrado em papel de filtração lenta tipo Whatman nº 42 e o resíduo lavado com HNO_3 0,1 mol L^{-1} . Ao final, o volume foi aferido em balão volumétrico de 50 mL e acondicionado para a determinação dos teores de potássio (K) em fotômetro de chama. O teor de K não-trocável foi obtido pela diferença entre K extraído com HNO_3 1 mol L^{-1} fervente e o K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0.

3.4.1.5 Determinação dos teores totais de potássio

Para a determinação do teor de K total, utilizou-se o método da digestão total com uma mistura ternária de ácidos fortes e concentrados ($\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$) proposto pela Embrapa (1997), com adaptações. Devido à falta de béquer de teflon ou de cadinho de platina (Pt) além de banho de areia, neste estudo optou-se pela utilização de tubos de ensaio (vidro) e de bloco aquecedor de alumínio (bloco digestor).

Amostras de 1,0 g de solo seco em estufa a 105 °C por 12 h foram colocadas em tubos de ensaio com diâmetro de 25 mm por 250 mm de altura com orla (capacidade de 120 mL). Em seguida, adicionou-se 2 mL de HNO_3 e 2 mL de HClO_4 . Os tubos foram distribuídos em bloco digestor a 150 °C, onde permaneceram por aproximadamente 30 min, até aparecer a fumaça branca densa do HClO_4 . Logo após, elevou-se a temperatura do bloco digestor a 230 °C até a evaporação completa (formação de resíduo seco). Ao resíduo frio foram adicionados

3 mL de HClO₄ e 5 mL de HF, deixando-se em contato durante a noite. No dia seguinte, os tubos foram novamente distribuídos em bloco digestor a 230 °C, onde permaneceram até a evaporação completa. Uma nova porção de 3 mL de HClO₄ e 5 mL de HF, foi adicionada e os tubos foram mantidos em bloco digestor até completa evaporação. Ao resíduo frio foram adicionados 3 mL de HClO₄, deixando-se evaporar completamente. Ao final, para dissolução do resíduo, 8 mL de água e 3 mL de HCl foram adicionados, deixando os tubos em bloco digestor até que a solução ficasse límpida. Após resfriamento, a solução foi transferida para balões de 100 mL e colocadas em estufa a 70 °C durante 12 h. Posteriormente, o extrato foi aferido e a suspensão filtrada em papel filtro de filtragem lenta tipo Whatman nº 42. Os teores de K foram determinados em fotômetro de chama.

3.4.2 Determinação do poder tampão de potássio (PTK) do solo

As medidas da relação quantidade/intensidade (Q/I) foram determinadas conforme método descrito por Mielniczuk (1978), com modificações. Optou-se por utilizar, como solução de referência, CaCl₂ 1 mmol L⁻¹.

Para se determinar os valores da relação Q/I amostras de cada solo receberam 6 concentrações de K. Tomou-se uma amostra de 3,0 g de TFSA de cada solo em tubos de polietileno de 80 mL, acrescentaram 30 mL de uma solução de equilíbrio de CaCl₂ 1 mmol L⁻¹ que continha as diferentes concentrações de K (0,0; 0,125; 0,25; 0,50; 0,75 a 1,0 mmol L⁻¹), na forma de cloreto de potássio. Procedimento este realizado em triplicata. Os tubos foram agitados por 1 h em agitador mecânico horizontal, com cerca de 180 oscilações por minuto. Após um período de repouso de 2 h, a suspensão foi filtrada em papel de filtragem lenta tipo Whatman nº 42 e uma alíquota de 10 mL do sobrenadante foi retirada para as determinações das concentrações de K por fotômetro de chama e de Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica (EAA), modalidade chama.

O fator quantidade, representado pela adsorção (+ΔK) ou dessorção (-ΔK) de K nos solos foi determinado pela diferença entre a concentração do elemento nas soluções iniciais (K_i) e a concentração após o equilíbrio com o solo (K_f), multiplicados pelo fator de diluição “F” (Equação 1).

$$\Delta K = (K_i - K_f) \times f \quad (\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ de solo}) \quad (\text{Equação 1})$$

onde, f = 10 (30 mL/3 g)

O fator intensidade, representado pelo quociente de atividade de potássio (QAK) foi determinado pela relação entre a atividade de K na solução de equilíbrio (a_K) pela atividade de $(a_{Ca^{2+}} + a_{Mg^{2+}})^{0,5}$, de acordo com a Equação 2.

$$QAK = \frac{a_K}{(a_{Ca} + a_{Mg})^{0,5}} \quad (\text{mmol L}^{-1})^{0,5} \quad (\text{Equação 2})$$

Os coeficientes de atividade (f), para calcular a atividade de K, Ca e Mg ($a = f \times c_i$), foram determinados pela fórmula de Debye-Huckel, descritas por Beckett (1964):

$$\log f = -0,509 \times Z^2 \times I^{0,5}$$

onde, Z é a valência do íon e I é a força iônica da solução calculada por:

$$I = \frac{1}{2} \sum (C_i Z_i^2)$$

sendo, C_i concentração molar do íon

A partir das medidas quantidade e intensidade, por meio de equações ajustadas para cada solo, foi construída “a curva” que relaciona o ΔK (fator quantidade) em função do QAK (fator intensidade) e estimaram-se os valores do quociente de atividade de equilíbrio (QAK_e), do potássio em equilíbrio na solução do solo (K_e) e poder tampão de potássio (PTK).

O QAK_e foi considerado o ponto onde o ΔK foi igual a zero, o K_e como sendo o intercepto da reta ao eixo ΔK , ou seja, quando $QAK = 0$, e o PTK, pela declividade da reta.

3.4.3 Análises de tecido vegetal

Para a determinação do teor de K na matéria seca da parte aérea das plantas, utilizou-se o método da digestão ácida utilizando uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) e ácido perclórico ($HClO_4$) na proporção 3:1 (v:v) de acordo com metodologia da Embrapa (1999). As quantidades de K total absorvido pelas plantas foram calculadas a partir das quantidades de matéria seca produzida por vaso e os respectivos teores na matéria seca.

A quantidade de K absorvida proveniente das formas não-trocáveis foi estimada, após cada cultivo, como sugerido por Castilhos et al. (2002), pela diferença entre o total absorvido pelas plantas e a soma do decréscimo no K trocável dos solos e da quantidade de K adicionada na adubação no ensaio com fertilização potássica (+K), considerada trocável para cálculo, conforme a equação:

$$K_{\text{ABSORVIDO DE FORMAS NÃO-TROCÁVEIS}} = K_{\text{ABSORVIDO TOTAL}} - [(K_{\text{TROCÁVEL ANTES DO CULTIVO}} - K_{\text{TROCÁVEL APÓS O CULTIVO}}) + K_{\text{ADUBAÇÃO}}]$$

Dessa forma, não havendo decréscimo do K trocável no solo, o K absorvido pelas plantas foi considerado todo proveniente das formas não trocáveis no solo. Havendo aumento do K trocável no solo após os cultivos, este aumento foi atribuído ao deslocamento das formas não trocáveis para a referida forma.

3.5 Análises Estatísticas

As variáveis avaliadas nos dois ensaios foram submetidas à análise de variância ($p < 0,05$), seguindo o modelo para o delineamento de blocos casualizados considerando os fatores solos ($S=12$), cultivos ($C=6$)⁽¹⁾ e bloco ($B=4$). As médias dos tratamentos e suas combinações que atingiram significância estatística foram comparadas pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Análises de correlação simples de Pearson foram executadas entre as características relacionadas com a disponibilidade de potássio nas amostras iniciais dos solos estudados. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SAEG versão 9.0 (UFV, 1999).

⁽¹⁾ Para as variáveis relacionadas às formas de potássio nos solos o fator cultivo foi igual a quatro ($C=4$), ou seja, antes dos cultivos, após o segundo, quarto e sexto cultivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FORMAS DE POTÁSSIO NO SOLO

As formas de potássio e a contribuição percentual de cada forma em relação ao K total variaram de acordo com o solo e o material de origem (Tabela 7).

O teor total de potássio nos solos, variou de 547 a 15.563 mg kg⁻¹, no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) coletado em Umuarama e no Nitossolo Vermelho eutrófico (NVe) de Ponta Grossa, respectivamente (Tabela 7). Villa et al. (2004), trabalhando com solos de várzea de Lavras (MG), também encontraram uma ampla variação para os teores de K total, corroborando com os dados obtidos por Lana e Neves (1994), Villa (1999) e Melo et al. (2005) para diferentes solos brasileiros.

Os teores de K total obtidos no presente estudo são superiores àqueles encontrados em solos de Minas Gerais, os quais variaram de 136 a 2.356 mg dm⁻³ (MORAIS et al., 2007), em solos do Planalto do Rio Grande do Sul, de 1.583 a 3.381 mg dm⁻³ (MIELNICZUK e SELBACH, 1978), em solos de Botucatu (SP), de 1.250 e 2.867 mg dm⁻³ (BÜLL, 1983) e em solos do cerrado, de 144 a 2.037 (VILELA et al., 2004), mas inferiores àqueles reportados por Lana e Neves (1994) em um Cambissolo álico de São Paulo (63.262 mg kg⁻¹), por Ramos et al. (2006) em solos da Colômbia (9.020 a 23.320 mg kg⁻¹) e por Taiwo et al. (2009) em solos da Nigéria (5.545 a 40.537 mg kg⁻¹). Teores de K total semelhantes aos obtidos neste estudo, foram evidenciados por Melo et al. (2003) e por Britkze et al. (2007) em solos de Minas Gerais, os quais verificaram que o K total variou de 154 a 16.938 mg kg⁻¹ e de 237 a 10.426 mg kg⁻¹, respectivamente.

TABELA 7. Formas de potássio e contribuição das diferentes formas para com o K total nas diferentes amostras de solos coletadas no Estado do Paraná

Solo	K total	K não-trocável	K disponível	K trocável	K solução
	----- mg kg ⁻¹ -----				
LVef	1.153	231 (20,0)	147 (12,7)	151 (13,1)	85 (7,4)
LVd	8.562	450 (5,3)	72 (0,8)	70 (0,8)	44 (0,5)
LVAe	1.003	192 (19,1)	64 (6,4)	74 (7,4)	39 (3,9)
LVAd	1.649	207 (12,6)	63 (3,8)	87 (5,3)	73 (4,4)
NVef	5.362	539 (10,1)	117 (2,2)	125 (2,3)	81 (1,5)
NVe	15.563	374 (2,4)	83 (0,5)	106 (0,7)	93 (0,6)
PVAd	547	134 (24,5)	58 (10,6)	49 (9,0)	46 (8,4)
PVAe	1.913	208 (10,9)	133 (7,0)	145 (7,6)	113 (5,9)
RRe	6.982	567 (8,1)	143 (2,0)	147 (2,1)	108 (1,5)
FX	7.706	263 (3,4)	73 (0,9)	70 (0,9)	28 (0,4)
GX	4.074	384 (9,4)	46 (1,1)	55 (1,4)	46 (1,1)
CX	2.050	211 (10,3)	102 (5,0)	109 (5,3)	104 (5,1)

⁽¹⁾ Número entre parênteses representa a contribuição percentual da cada fração de K em relação ao K total. (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

O teor de K não-trocável, variou de 134 a 567 mg kg⁻¹, representando uma contribuição para o K total de 2,4 a 24,5%, indicando que o fornecimento de K a médio prazo teve grande variação entre os solos. Cabe ressaltar que para o solo PVAd, a maior contribuição percentual da forma não-trocável (24,5%) foi favorecida pelo baixo teor de K total nesse solo. Por outro lado, para o solo NVe, a menor participação das formas de K não-trocável (2,4%), disponível (0,5%) e trocável (0,7%) para o K total não indica menores teores do nutriente no solo, pois, na verdade, esta contribuição está relacionada com os teores elevados obtidos para o K total desse solo (Tabela 7).

Para Latossolos da região dos Campos da Vertentes (MG), Silva et al. (2000) verificaram que a forma não-trocável variou de 79 a 354 mg kg⁻¹ e que a contribuição desta forma variou de 0,7 a 12,7%. Em solos de várzea Villa et al. (2004) verificaram que o K não-trocável variou de 24 a 238 mg kg⁻¹, valores estes que representaram de 1,0 a 6,3% do K total do solo.

Teores de K não-trocável superiores aos obtidos neste estudo foram reportados por Lana e Neves (1994) em solos de São Paulo (34 a 3.062 mg kg⁻¹), por Chaves e Dias (1996) em solos da Paraíba (1.443 a 5.031 mg kg⁻¹), e por Taiwo et al. (2009) em solos da Nigéria (5.460 a 40.170 mg kg⁻¹). Por sua vez, Silva et al. (1995) encontraram valores inferiores de K não-trocável (17 a 67 mg kg⁻¹) em dois Latossolos na região norte do Paraná.

A classificação do K no solo em trocável e não-trocável, segundo Fernandes et al. (1993), em certas situações não têm-se mostrado adequada. Um desses casos é quando acontece da fração não trocável ser menor que a fração trocável, indicando que a extração com HNO_3 1 mol L^{-1} fervente pode não ser o melhor método para avaliar a reserva de potássio em certos solos. Nesse estudo, esse fato não ocorreu para nenhum dos solos estudados, onde a fração não-trocável foi a forma que mais contribuiu para o K total dos solos (Tabela 7). Resultados diferentes foram evidenciados por Villa (1999), Silva et al. (2000) e Cabbau et al. (2004) em solos de Minas Gerais, os quais verificaram que as frações que mais contribuíram para o K total foram as formas trocável e em solução. Essa maior contribuição da forma não-trocável para com o K total observados no presente estudo, possivelmente deve-se ao não histórico de fertilização potássica da grande maioria dos solos estudados (Tabela 3).

Em relação ao K disponível, extraído pelo Mehlich-1, as quantidades variaram de 58 até 147 mg dm^{-3} . Cabe salientar que esta forma de K representou de 0,5 até 12,7% do K total do solo, indicando que o teor disponível teve grande variação e a disponibilidade depende das reservas de K do solo.

De acordo com os níveis de fertilidade para interpretação do potássio disponível (Mehlich-1) do solo para o Estado do Paraná apresentado por Ernani et al. (2007), os solos LV, LVAe, LVAd, PVAd, FX e GX encontravam-se com níveis baixo (40 a 80 mg dm^{-3}), os solos NVEf, NVE e CX com nível médio (80 a 120 mg dm^{-3}) e os solos LVEf, PVAe e RRe com nível alto ($> 120 \text{ mg dm}^{-3}$) de disponibilidade de potássio. Estes dados demonstram que 75% dos solos estudados encontravam-se abaixo do nível crítico de disponibilidade de potássio. Fato este certamente em decorrência do histórico de não fertilização potássica desses solos, conforme já comentado.

Em solos de várzea do Rio Grande do Sul, Britzke et al. (2007) verificaram que o teor de K disponível (Mehlich-1) variou de 32 a 262 mg kg^{-1} , valores estes que representaram de 0,7 a 79,1% do K total do solo. Para solos de Minas Gerais Cabbau et al. (2004) verificaram que o K extraído por Mehlich-1 variou de 44 a 82 mg dm^{-3} representando de 0,6 a 3,3% do K total. Evidências estas que demonstram que as formas prontamente disponíveis podem representar grande variação na contribuição do K total.

O teor de K trocável nos solos, variou de 49 mg kg^{-1} no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) a 151 mg kg^{-1} no Latossolo Vermelho eutrófico (LVEf). A contribuição desta forma para o K total foi de 0,7 a 9,0%, indicando que o fornecimento de K a curto prazo teve grande variação entre os solos.

O teor de K na solução dos solos, variou de 39 a 113 mg kg⁻¹, representando uma contribuição para o K total de 0,4 a 8,4% (Tabela 7). Todos os solos estudados apresentaram concentrações de potássio na solução de equilíbrio superiores à concentração considerada por Raij (1981) como suficiente para o desenvolvimento vegetal, que é de 11,7 mg dm⁻³, comportamento este também observado em solos de Minas Gerais por Villa et al. (2004) e Cabbau et al. (2004).

A CTC dos solos, que varia em função do teor de matéria orgânica, do tipo e da quantidade de argila e do pH do solo, é o principal componente que determina a maior ou menor relação K trocável/K da solução, isto é, para uma mesma quantidade de K trocável, haverá menos K na solução em solos com alta CTC. Evidências estas também constatadas neste estudo. O PVAd e o CX que apresentam os menores valores de CTC (6,47 e 9,98 cmol_c dm⁻³, respectivamente) foram os solos que possuem a menor relação K trocável/K na solução 1,06 e 1,05 (Tabela 7), conseqüentemente refletindo nesta maior proporção do K presente na solução do solo. Aliado a isso, estes solos apresentam baixos teores de silte e argila (Tabela 3), o que também influencia nos teores trocáveis desse nutriente.

As medidas da relação quantidade/intensidade (Q/I) são apresentados na tabela 8. O quociente de atividade de equilíbrio (QAKe) variou de 0,36 a 0,96 (mmol L⁻¹)^{1/2}, o potássio em equilíbrio (Ke) variou de 0,75 a 8,95 mmol_c kg⁻¹, enquanto o poder tampão de potássio (PTK) oscilou entre 1,28 e 12,79 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{1/2}. A grande variação desses parâmetros pode ser atribuída às diferenças nos atributos químicos e físicos dos solos, como a CTC, teor de matéria orgânica e teor de silte (Tabelas 3 e 4).

Valores semelhantes foram obtidos por Villa et al. (2004) em solos de várzea de Lavras (MG), os quais encontraram valores de PTK de 4,2 a 11,0 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{1/2}, de QAKe de 0,13 a 0,65 (mmol L⁻¹)^{1/2} e de Ke de 0,6 a 0,4 mmol_c kg⁻¹. Em diferentes Latossolos de Campos das Vertentes (MG), Silva et al. (2000) também encontraram valores semelhantes de PTK de 2,23 a 8,32 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{1/2}, de QAKe de 0,15 a 0,49 (mmol L⁻¹)^{1/2}, e de Ke 0,31 a 2,54 mmol_c kg⁻¹.

Trabalhando com amostras de Regossolos do Estado da Paraíba, Chaves e Dias (1996) encontraram valores menores de PTK (0,3 a 2,4 (mmol_c dm⁻³)/(mmol L⁻¹)^{1/2}) e de Ke (0,6 – 1,1 mmol_c dm⁻³), mas valores pouco superiores para QAKe de 0,33 a 2,51 (mmol L⁻¹)^{1/2}.

Os maiores valores de PTK, foram verificados para o PVAe, RRe e NVef com 12,79; 10,92 e 9,21 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{1/2}, respectivamente. Já o PVAd e o FX apresentaram os menores valores de PTK 1,28 e 2,07 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{1/2}, respectivamente (Tabela 8).

TABELA 8. Parâmetros de ajuste da equação da relação quantidade/intensidade, quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), potássio em equilíbrio (Ke) e poder tampão de potássio (PTK) nas diferentes amostras de solos coletadas no Estado do Paraná

Solo	Parâmetros da equação de regressão ⁽¹⁾			QAKe (mmol L ⁻¹) ^{1/2}	Ke mmolc kg ⁻¹	PTK (mmolc kg ⁻¹)/(mmol L ⁻¹) ^{1/2}
	Intercepto (α)	Coefficiente de inclinação (β)	R ²			
LVef	- 4,587	7,831	0,95**	0,58	4,59	7,83
LVd	- 3,329	3,504	0,94**	0,95	3,33	3,50
LV Ae	- 1,627	4,099	0,95**	0,40	1,63	4,10
LV Ad	- 4,495	4,677	0,96**	0,96	4,50	4,68
NVef	- 3,677	9,206	0,96**	0,40	3,68	9,21
NVe	- 3,366	5,784	0,95**	0,58	3,37	5,78
PV Ad	- 1,181	1,276	0,92**	0,92	1,18	1,28
PV Ae	- 8,951	12,790	0,97**	0,70	8,95	12,79
RRe	- 5,998	10,920	0,98**	0,55	6,00	10,92
FX	- 0,754	2,072	0,97**	0,36	0,75	2,07
GX	- 4,377	6,685	0,96**	0,65	4,38	6,68
CX	- 1,501	2,568	0,98**	0,58	1,50	2,57

⁽¹⁾ α e β parâmetros de ajuste à equação linear da relação Q/I ($y = \alpha + \beta x$) para a determinações do QAKe, Ke e PTK. R² coeficiente de determinação do ajuste da relação Q/I. ** significativo ao nível de 1% pelo teste t. (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LV Ae = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LV Ad = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PV Ad = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PV Ae = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Segundo Ernani et al. (2007) o PTK é a capacidade que o solo tem em manter estável a concentração de K na solução, à medida que o K é adicionado ou retirado do solo. Assim admite-se que, em termos de disponibilidade às plantas, é importante que o solo apresente uma relação Q/I alta (alto PTK), porém acompanhada de um valor alto de fator intensidade. Com base nestas evidências, para os solos PV Ae, RRe e NVef, que apresentam o maior PTK, as adubações potássicas poderão ser realizadas em doses maiores e mais espaçadas, visto que possuem maior capacidade de manter a atividade de K em solução. Por outro lado, para os solos PV Ad, FX e CX as adubações deverão ser realizadas em doses menores e mais frequentes de forma a minimizar as perdas de K por lixiviação e até mesmo o consumo de luxo pelas plantas, devido a maior parte do K encontrar-se em solução (Tabela 7).

Gianello e Mielniczuk (1981) verificaram que o PTK foi o segundo fator que mais influenciou a absorção de K pelo milho em solos do Rio Grande do Sul, só superado pela concentração de K na solução do solo.

Em solos onde existe um teor considerável de minerais do tipo 2:1 e concomitante valores elevados de pH, pode haver fixação de K nas entrecamadas desses minerais, porém, esse fenômeno é pouco expressivo nos solos brasileiros (ERNANI et al., 2007).

Todos os solos estudados, apresentaram relação linear e significativa ($p < 0,01$) entre os fatores quantidade e intensidade (Tabela 8), indicando, segundo Defelipo (1974) em que nos colóides dos solos, com predomínio de argilominerais do tipo 1:1 como os brasileiros, não existem locais específicos para adsorção do potássio. Ernani et al. (2007) ainda complementam, e relatam que a relação Q/I é linear dentro de uma ampla faixa de valores de K no solo. Apesar dos coeficientes de determinação (R^2) das equações da relação Q/I terem sido significativos (Tabela 8), quando foram correlacionados os Ke (fator quantidade), QAKe (fator intensidade) e PTK entre si e com as diferentes formas de K determinadas nos solos, foram observadas correlações significativas apenas entre Ke e PTK e destes com as formas prontamente disponíveis (K disponível, trocável e em solução) (Tabela 9). O QAKe não se correlacionaram significativamente com nenhuma das características relacionadas a disponibilidade de K no solo (Tabela 9). Por outro lado, verifica-se que a $CTC_{pH\ 7,0}$ e o teor de argila são atributos que mais influenciam o PTK dos solos.

Já Silva et al. (2000) não encontraram correlação significativa entre os parâmetros da relação Q/I e PTK com as formas de K no solo. Chaves e Dias (1996) encontraram correlação significativa apenas entre o PTK e QAKe.

TABELA 9. Coeficiente de correlação linear simples entre as várias características relacionadas com a disponibilidade de potássio nas amostras de solos coletadas no Estado do Paraná

	K total	K não-trocável	K disponível	K trocável	K solução	QAKe	Ke	PTK	$CTC_{pH\ 7,0}$	Teor de argila
K não-trocável	0,62*									
K disponível	0,04	0,43								
K trocável	0,09	0,42	0,96***							
K solução	0,12	0,31	0,78**	0,87**						
QAKe	- 0,16	- 0,22	- 0,25	- 0,25	0,02					
Ke	- 0,04	0,23	0,75*	0,81**	0,87**	0,18				
PTK	0,03	0,43	0,89**	0,93***	0,89**	- 0,20	0,90**			
$CTC_{pH\ 7,0}$	0,42	0,55	0,44	0,49	0,45	- 0,34	0,81**	0,88**		
Teor de argila	0,54	0,46	0,64*	0,65*	- 0,27	- 0,16	0,78**	0,86**	0,92***	
K absorvido ⁽¹⁾	- 0,13	0,28	0,84**	0,89**	0,90**	- 0,18	0,72*	0,82**	0,42	0,36

⁽¹⁾ K total absorvido nos seis cultivos no ensaio sem fertilização potássica. QAKe = quociente de atividade de equilíbrio; Ke = potássio em equilíbrio; PTK = poder tampão de potássio. *, ** e *** significativo ao nível de 5%, 1% e 0,1% pelo teste t, respectivamente.

Os valores de K extraído pelo Mehlich-1 (K disponível) foram muitos próximos ao extraído pelo acetato de amônio $1\ mol\ L^{-1}$ a pH 7,0 (K trocável) (Tabela 7), apresentando um coeficiente de correlação altamente significativo ($r = 0,96$; $p < 0,001$) para os solos estudados (Tabela 9). Esses resultados mostram que o K ocupa, no complexo, posição de troca acessível

aos dois extratores testados, corroborando com os dados obtidos por Prezotti e Defelipo (1987).

Os teores de K total apenas se correlacionaram significativamente ($r = 0,62$; $p < 0,05$) com a fração não-trocável (Tabela 9), estando de acordo com Prezotti e Defelipo (1987), porém contrário a Chaves e Dias (1996), que trabalhando com solos do Estado da Paraíba, encontraram correlação entre o K total e todas as demais formas presentes no solo.

A falta de correlação entre o K trocável com o K não-trocável e total, demonstra que os solos que possuem maiores teores de K trocável (suprimento a curto prazo) não possuem necessariamente maiores teores de K não-trocável e total (suprimento a médio e a longo prazo). Estes dados sugerem que, apesar da quantidade trocável dar uma boa idéia da disponibilidade atual, não é indicativo do potencial natural do solo para repor este elemento no médio e longo prazo no complexo de troca catiônica, conforme apresentado por Lepsch et al. (1978). Morais et al. (2007) trabalhando com solos do Estado de Minas Gerais, também verificaram que o K trocável não apresentou correlação significativa com a forma não-trocável. Resultados contrários são reportados na literatura nacional, onde diversos estudos demonstram que o K trocável está estreitamente relacionado com o K total e não-trocável, conforme verificado por Crisóstomo e Castro (1970); Chaves e Dias (1996), em solos do nordeste, Braga (1972); Prezotti e Defelipo (1987); Villa et al. (2004), em solos de Minas Gerais, Mielniczuk e Selbach (1978); Nachigall e Vahl (1989), em solos do Rio Grande do Sul.

Os resultados da tabela 9 demonstram que houve correlação significativa entre as formas prontamente disponíveis (K disponível, trocável e na solução), devido ao rápido equilíbrio que existem entre estas formas no solo e corroboram com os dados obtidos por Morais et al. (2007).

O PTK correlacionou-se significativa ($r = 0,86$; $p < 0,01$) com o teor de argila do solo. Segundo Chaves e Kinjo (1987) e Silva et al. (2000), o PTK está relacionado à porcentagem de argila, o que corrobora os resultados deste trabalho.

Os atributos do solo que contribuíram para a absorção de K pelas plantas nos seis cultivos foi o K disponível, K trocável, K na solução, Ke e PTK (Tabela 9). Villa et al. (2004) verificou que forma de K trocável foi a que mais contribuiu para a absorção desse elemento pelo feijoeiro.

A quantidade total de potássio absorvido pelas plantas correlacionou-se significativa ($r = 0,82$; $p < 0,01$) com o PTK do solo. Resultados estes já esperados, em virtude de que o solo com maior PTK possui maior capacidade de manter a atividade de K em solução, o qual pode

ser absorvido. Assim, no manejo da adubação potássica é essencial considerar os valores de PTK, uma vez que o tamponamento do potássio no solo é importante para a manutenção da concentração do nutriente junto às raízes. Gianello e Mielniczuk (1981) verificaram que o PTK foi o segundo fator que mais influenciou a absorção de K pelo milho em solos do Rio Grande do Sul, só superado pela concentração de K na solução do solo. No presente estudo, verifica-se que o PTK também foi um dos fatores que mais influenciaram a absorção de K pelas plantas, só superado pelas formas prontamente disponíveis (Tabela 9).

O teor de K total no solo antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica são apresentados na tabela 10. Verifica-se que houve grande variação nos teores de K total entre os solos, principalmente em função do material de origem e do grau de intemperismo. O menor teor de K total obtido no solo LVef coletado na Formação Serra Geral (basalto), se deve ao avançado grau de intemperismo desse solo ($K_i = 1,79$) e ao predomínio de caulinita e de óxidos de Fe e Al como argilominerais dominantes (Tabela 5), os quais apresentam pequenas quantidades de minerais primários que contém K na sua estrutura. Silva et al. (2000), Dias et al. (2007) e Morais et al. (2007), também evidenciaram menores teores de K total em solo em avançado grau de intemperismo e/ou derivados de rochas básicas, que são pobres em feldspatos potássicos. Em amostra de Latossolo Vermelho-Amarelo do Ceará, Diniz et al. (2007), utilizando análise semiquantitativa dos argilominerais, observaram que 95% da fração argila é constituído de caulinita.

Os solos jovens mesmo provenientes de basalto (NVef e RRe) apresentaram teores elevados de K total (Tabela 10). Segundo Ernani et al. (2007), solos de origem mais recente, apresentam maiores reservas de nutrientes, graças à presença de teores expressivos de micas e feldspatos nas frações mais grossas, as quais representam importantes fontes de potássio. Os autores ainda relatam que a concentração de potássio nas rochas básicas (basalto) podem chegar até 7.000 mg kg^{-1} . Resultados contrários foram evidenciados por Melo et al. (2003), os quais observaram que mesmo solos jovens desenvolvidos de basalto, como o NVef, não apresentam altos teores de K total.

O menor valor de K total (547 mg kg^{-1}) observado para o solo PVAe se deve em decorrência deste solo apresentar mais de 89% de areia (Tabela 4). Melo et al. (2002) e Melo et al. (2004a) verificaram que as frações areia grossa e muito grossa apresentam mineralogia composta quase que exclusivamente por quartzo. Apesar que alguns trabalhos têm mostrado a importância das frações mais grossas como reserva deste nutriente (PREZOTTI e DEFELIPO, 1987; DINIZ et al., 2007), a grande maioria dos minerais potássicos presentes no solo

encontram-se na fração argila (AL-KANANI et al., 1984; SIMARD et al., 1989; RICCI et al., 1989; MELO et al., 2003).

TABELA 10. Teor de potássio total nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Antes dos cultivos	Cultivo ⁽¹⁾						CV
			1	2	3	4	5	6	
			----- mg kg ⁻¹ -----						(%)
	LVEf	1.153 hA	-	1.155 hA	-	1.158 hA	-	1.164 hA	
	LVd	8.562 bA	-	8.592 bA	-	8.623 bA	-	8.685 bA	
	LVAe	1.003 hA	-	1.013 hA	-	1.023 hA	-	1.043 hA	
	LVAd	1.649 gA	-	1.649 gA	-	1.648 gA	-	1.648 gA	
	NVEf	5.362 eA	-	5.363 eA	-	5.365 eA	-	5.368 eA	
	NVe	15.563 aA	-	15.621 aA	-	15.680 aA	-	15.797 aA	8,65
+K	PVAd	547 iA	-	554 iA	-	562 iA	-	577 iA	
	PVAe	1.913 gA	-	1.903 gA	-	1.893 gA	-	1.919 gA	
	RRe	6.982 dA	-	7.023 dA	-	7.063 dA	-	7.145 dA	
	FX	7.706 cA	-	7.756 cA	-	7.806 cA	-	7.907 cA	
	GX	4.074 fA	-	4.101 fA	-	4.127 fA	-	4.181 fA	
	CX	2.050 gA	-	2.072 gA	-	2.094 gA	-	2.138 gA	
	Média	4.714		4.734		4.754		4.798	
	LVEf	1.153 hA	-	1.191 hA	-	1.129 hA	-	1.106 hA	
	LVd	8.562 bA	-	8.006 bA	-	7.452 bB	-	7.341 bB	
	LVAe	1.003 hA	-	973 hA	-	943 hA	-	922 hA	
	LVAd	1.649 gA	-	1.584 gA	-	1.518 gA	-	1.386 eA	
	NVEf	5.362 eA	-	5.171 eA	-	4.980 eA	-	4.898 eA	
	NVe	15.563 aA	-	15.147 aA	-	14.731 aA	-	14.599 aA	9,77
-K	PVAd	547 iA	-	520 iA	-	494 iA	-	441 iA	
	PVAe	1.913 gA	-	1.833 gA	-	1.752 gA	-	1.692 gA	
	RRe	6.982 dA	-	6.833 dA	-	6.684 dA	-	6.584 dA	
	FX	7.706 cA	-	7.639 cA	-	7.572 cA	-	7.437 bA	
	GX	4.074 fA	-	4.056 fA	-	4.038 fA	-	4.003 fA	
	CX	2.050 gA	-	2.041 gA	-	2.032 gA	-	2.015 gA	
	Média	4.714		4.583		4.444		4.369	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. – não determinado. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Os teores mais elevados de K total foram obtidos nos solos (LVd, NVe e FX) provenientes de sedimentos da Formação Ponta Grossa constituídos por folhelhos muito micáceos (Tabela 2) e corroboram com os dados apresentados por Ernani et al. (2007), os quais relatam que as rochas sedimentares pelíticas (folhelhos) apresentam concentração de K

de até 30.000 mg kg⁻¹. Estes resultados estão associados à presença de mica como mineral fonte de K na sua estrutura (MINEROPAR, 2009). Silva et al. (2000) também encontraram os maiores valores de K total nos solos originários de rochas pelíticas, que segundo Resende et al. (1997) são materiais relativamente ricos em minerais potássicos.

O teor de K total do solo, independentemente da adição de fertilizante potássico, foi pouco afetado pelos cultivos sucessivos na maioria dos solos (Tabela 10). Esse resultado demonstra que o K estrutural foi pouco acessível às plantas durante os seis cultivos e corrobora com os dados obtidos por Kaminski et al. (2007) e Dias et al. (2007). Já Moterle et al. (2006), avaliando a contribuição das formas de potássio no suprimento de cinco cultivos, verificaram que houve redução dos teores de K total, no tratamento sem adição de potássio, evidenciando que, além da forma não-trocável, o K estrutural (K total) também contribuiu para o fornecimento do nutriente nos solos sem adição de potássio. Este mesmo comportamento foi observado no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (Tabela 10). O teor inicial era de 8.562 mg kg⁻¹ e ao final do sexto cultivo, passou para 7.341 mg kg⁻¹, diminuição de, aproximadamente, 14%.

Embora os cultivos não tenham influenciado significativamente os teores de K total, houve uma tendência de aumento dos teores com a adição de fertilizante potássico e de decréscimo no ensaio sem fertilização potássica (Tabela 10). Na média geral dos solos, o teor de K total nos ensaios com (+K) e sem (-K) fertilização potássica, antes do cultivo, eram de 4.714 mg kg⁻¹ e após o sexto cultivo passaram para 4.798 mg kg⁻¹ e 4.369 mg kg⁻¹, valores estes que representam um aumento de 1,78% e um decréscimo de 7,32%, respectivamente.

Estudando as alterações das diversas formas de potássio em Latossolo Vermelho eutroférrico de Jaboticabal (SP), Chiba et al. (2008) verificaram que a adição de fertilizante potássico, independentemente da dose aplicada, elevou os teores de K total, em todas as profundidades, após o segundo ciclo de cultivo da bananeira. Os autores evidenciaram que os teores de K total passaram de 2.457 mg kg⁻¹ para 2.594 mg kg⁻¹ na camada de 0-20 cm, representando um aumento de 5,6%.

O teor de K não-trocável no solo antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica são apresentados na tabela 11. Verifica-se que houve grande variação nos teores de K não-trocável entre os solos, e que estes valores foram influenciados pelos cultivos e adição de fertilizante potássico. Nas amostras iniciais os maiores valores da fração de K não-trocável foram obtidos para os solos NVef e RRe (Tabela 11), possivelmente relacionada com os teores mais elevados de silte (Tabela 4) e de K total (Tabela 7) desses solos. Segundo relatado por Villa (1999), solos menos intemperizados e com maiores teores

de silte apresentam também maiores teores de K não-trocável e total. Em solos do Estado do Ceará, Diniz et al. (2007) verificaram que 58% e 67% do teor total do K não-trocável presente no Neossolo Quartzarênico (NQ) e no Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), respectivamente, encontravam-se na fração silte. Confirmando a importância da fração silte para o teor de K não-trocável do solo.

TABELA 11. Teor de potássio não-trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Antes dos cultivos	Cultivo ⁽¹⁾						CV (%)
			1	2	3	4	5	6	
			----- mg kg ⁻¹ -----						
	LVEf	231 dB	-	274 dA	-	233 dB	-	301 dA	11,31
	LVd	450 bA	-	425 cA	-	392 cB	-	360 dB	
	LVAe	192 dB	-	255 dA	-	250 dA	-	231 eA	
	LVAd	207 dB	-	284 dA	-	198 eB	-	214 eB	
	NVEf	539 aA	-	530 bA	-	507 bA	-	520 bA	
	NVe	374 cB	-	639 aA	-	665 aA	-	640 aA	
+K	PVAd	134 eA	-	145 eA	-	150 fA	-	168 fA	
	PVAe	208 dB	-	472 cA	-	482 bA	-	473 cA	
	RRe	567 aA	-	531 bA	-	536 bA	-	556 bA	
	FX	263 dA	-	251 dA	-	208 dB	-	244 eA	
	GX	384 cB	-	429 cB	-	499 bA	-	505 cA	
	CX	211 dB	-	314 dA	-	313 cA	-	316 dA	
	Média	314		379		370		377	
	LVEf	231 dA	-	188 cB	-	139 cC	-	92 cD	
	LVd	450 bA	-	280 bB	-	136 cC	-	96 cD	
	LVAe	192 dA	-	108 eB	-	106 dB	-	93 cB	
	LVAd	207 dA	-	148 dB	-	121 cC	-	101 cC	
	NVEf	539 aA	-	334 aB	-	261 aC	-	179 aD	
	NVe	374 cA	-	264 bB	-	200 bC	-	136 bD	
-K	PVAd	134 eA	-	98 eB	-	82 dB	-	50 dC	
	PVAe	208 dA	-	163 cB	-	135 cC	-	97 cD	
	RRe	567 aA	-	338 aB	-	192 bC	-	137 bD	
	FX	263 dA	-	141 dA	-	97 dB	-	59 dC	
	GX	384 cA	-	265 dB	-	126 cC	-	72 dD	
	CX	211 dA	-	132 dB	-	113 dB	-	60 dC	
	Média	314		205		142		98	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. – não determinado. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Com a fertilização potássica (+K) houve um acréscimo nos teores de K não-trocável, para a maioria dos solos, ao longo dos cultivos (Tabela 11). Isso se deve possivelmente à

adição contínua de fertilizantes potássicos que promove alterações nos minerais potássicos existentes no solo. Cabe ressaltar que para os solos N_Vef e RRe os teores de K não-trocável permaneceram constantes durante todo a condução do experimento.

Chiba et al. (2008) avaliando as alterações das diversas formas de potássio em Latossolo Vermelho eutroférico de Jaboticabal (SP), verificaram que a adição anual de 900 kg ha⁻¹ de K₂O, elevou os teores de K não-trocável de 1.540 para 2.164 mg kg⁻¹, na camada 0-20 cm, após o segundo ciclo da cultura de bananeira, representando um aumento de, aproximadamente, 40%. Resultados semelhantes foram evidenciados por Bortoluzzi et al. (2005), em estudo conduzido durante 11 anos sob um Argissolo Vermelho de Santa Maria (RS). Os autores verificaram que os teores de K total, não-trocável e trocável foram incrementados com a adição de fertilizantes potássicos, refletindo no aumento das fases minerais ilita e interestratificado do tipo ilita-esmectita, em comparação com solo sem adição de fertilizantes potássicos.

Velde e Peck (2002) observaram, num experimento em solo siltoso e com duração de 86 anos, em Illinois-USA, que o cultivo de milho em monocultura ou em rotação pode provocar uma evolução diferenciada em sua mineralogia. Esses autores observaram alterações na proporção das camadas de ilita em relação às de esmectitas nos minerais interestratificados. O argilomineral interestratificado do tipo ilita-esmectita (I-E) comportou-se tanto como fonte como dreno de K, quando a solução do solo era pobre ou rica nesse nutriente, respectivamente. Segundo Pernes-Debuyser et al. (2003), a alteração dos minerais potássicos pelo intemperismo pode ser minimizada com a adição de fertilizantes potássicos.

O cultivo de plantas com grande capacidade de absorver K e o uso de fertilizantes potássicos podem influir na relação entre as reservas de K do solo e a sua disponibilidade, em função das alterações da fase mineral do solo (SANZONOWICZ e MIELNICZUK, 1985; MEURER e ANGHINONI, 1993). Hinsinger e Jaillard (1993) verificaram a formação de vermiculita, em detrimento de ilita, no material do solo da rizosfera de *Lolium* em apenas 32 dias de cultivo. Nessas condições, a liberação de K das entrecamadas da ilita, induzida pela ação das raízes das plantas, foi quase completa. Já Mielniczuk e Selbach (1978) e Moterle et al. (2005) destacam que a depleção de potássio no solo cultivado ocorre tanto na forma trocável como na forma não-trocável, mesmo quando há adições periódicas de fertilizantes potássicos. No presente estudo tal comportamento apenas foi evidenciado para o solo LVd, em que o teor de K não trocável passou de 450 mg kg⁻¹ (antes do cultivo) para 360 mg kg⁻¹ (após o sexto cultivo), representando uma redução de 20% (Tabela 11).

Werle et al. (2008) verificaram que o K não-trocável tem grande influência na lixiviação de K em solos com históricos regulares de adubação potássica, em função da quantidade de adubo aplicado. Os referidos autores observaram que 68% de K percolado na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O foi proveniente de formas consideradas não-trocáveis. Os autores atribuíram este resultado a dois fatos: i) parte considerável do adubo aplicado é convertida em formas inicialmente não-trocáveis; e ii) a passagem do K não-trocável para formas trocáveis e sujeitas a lixiviação é rápida, alterando de forma intensa a dinâmica desse elemento no perfil do solo. Isso torna a reposição da reserva de K não-trocável muito difícil, pois o próprio K considerado não-trocável pode ser lixiviado. Essa transição entre K trocável e não-trocável também foi relatada por Rosolem et al. (2006), em que o K oriundo da palha de milho e do fertilizante incrementou o teor de K não-trocável de um solo esgotado até a camada de 8 cm.

Sem a fertilização potássica (-K) houve uma redução dos teores de K não-trocável em todos os solos estudados (Tabela 11), evidenciando a contribuição da forma não-trocável, conforme salientado por Castilhos e Meurer (2002). Os teores de K não-trocável antes dos cultivos variaram de 134 a 567 mg kg⁻¹ (média de 314 mg kg⁻¹), após o segundo cultivo esses teores diminuíram de 98 a 338 mg kg⁻¹ (média de 205 mg kg⁻¹), indicando uma redução média de 35%. Após o quarto e sexto cultivos, os teores variaram de 82 a 261 mg kg⁻¹ (média de 142 mg kg⁻¹) e de 50 a 179 mg kg⁻¹ (média de 98 mg kg⁻¹), representando uma redução em relação a média inicial de 55% e 69%, respectivamente, e evidenciando acentuada depleção da fração não-trocável do solo com os cultivos. Estes resultados corroboram com os obtidos por Kamisnki et al. (2007), os quais verificaram que os teores de K não-trocável extraído por HNO₃ e Na-TFBo, sem adição de potássio, ao final do quinto cultivo sofreram diminuição de 50% e 80%, respectivamente. De modo similar, Lana e Neves (1994) verificaram que os teores de K não-trocável decresceram, em média, 55% após o quarto cultivo de eucalipto.

Fraga et al. (2009) avaliando a contribuição das formas trocáveis e não-trocáveis na absorção de K em cultivos sucessivos de arroz irrigado, verificaram que o suprimento em curto prazo (primeiro cultivo) foi condicionada pelo teor de K trocável do solo e com o passar do tempo (segundo e terceiro cultivos), pelo suprimento de formas não trocáveis, especialmente de feldspatos potássicos, esmectita e esmectita com hidróxi-Al entrecamadas.

Segundo Borkert et al. (1993), 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 esgotado, dá-se a liberação do K contido nas entrecamadas dos argilominerais e acelera-se a intemperização dos minerais primários potássicos.

Segundo Castilhos e Meurer (2001), o K não-trocável pode ser uma fonte disponível às plantas em médio prazo. Contudo, a cinética de liberação desta forma de K para a solução do solo é muito variável, dependendo principalmente de fatores relacionados com a mineralogia do solo e a sua proporção em cada fração granulométrica e com a seletividade da fase mineral pelo K (MELLO et al., 1995; CASTILHOS e MEURER, 2001).

Resultados diferentes aos observados neste estudo foram evidenciados por Dias et al. (2007), os quais avaliando as modificações das formas de K em um Latossolo Vermelho de Londrina, PR, sob cultivos sucessivos, observaram pequena diminuição das formas não-trocáveis. Demonstrando que mesmo sendo um solo altamente intemperizado apresenta reservas, que podem ser disponibilizadas às plantas em cultivos sucessivos. Os autores ainda concluíram que os cultivos esgotam lentamente as reservas de K no solo.

O teor de K disponível no solo extraído pelo Mehlich-1 antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica são apresentados na tabela 12. Os dados demonstram que houve grande variação nos teores de K disponível entre os solos, e que estes valores foram influenciados significativamente pelos cultivos.

A adição de fertilizante potássico (+K), proporcionou aumentos significativos nos teores de K disponível (Mehlich-1), para a maioria dos solos estudados (Tabela 12). Cabe ressaltar que estes aumentos, na maioria dos solos, foi em decorrência da maioria destes solos não possuírem históricos de fertilização potássica.

Os teores de K disponível antes dos cultivos variaram de 46 a 147 mg kg⁻¹ (média de 92 mg kg⁻¹), após do segundo cultivo esses teores passaram para 92 a 161 mg kg⁻¹ (média de 133 mg kg⁻¹), indicando um aumento médio de, aproximadamente, 45%. Nos demais cultivos, os teores permaneceram constantes e variaram de 86 a 156 mg kg⁻¹ (média de 134 mg kg⁻¹) e de 90 a 153 mg kg⁻¹ (média de 130 mg kg⁻¹), representando um aumento em relação a média inicial de 46% e 41%, respectivamente, após o quarto e sexto cultivos. Evidencia-se que após o segundo cultivo os teores de K disponível estabilizaram-se ao nível de 132 mg kg⁻¹.

Sem a fertilização potássica (-K), houve um decréscimo dos teores de K disponível do solo, que antes dos cultivos variaram de 46 a 147 mg kg⁻¹ (média de 92 mg kg⁻¹), após o segundo cultivo diminuíram para 22 a 67 mg kg⁻¹ (média de 37 mg kg⁻¹), indicando um decréscimo médio de, aproximadamente, 60%. Após o quarto e sexto cultivo, os teores de K disponível permaneceram constantes e variaram de 14 a 40 mg kg⁻¹ (média de 27 mg kg⁻¹) e de 13 a 36 mg kg⁻¹ (média de 24 mg kg⁻¹), representando um decréscimo em relação a média inicial de 71% e 74%, respectivamente (Tabela 12). Dados estes que demonstram que os teores de K disponível (Mehlich-1), na média geral, estabilizaram-se no patamar de 25 mg kg⁻¹.

¹, indicando que se alcançou um equilíbrio entre as formas trocável e não-trocável com um mínimo de K⁺ disponível no sistema solo-planta. Segundo Novais (1999), os teores de K disponíveis tendem a declinar rapidamente com as sucessivas colheitas, principalmente em solos de textura média à arenosa, com alta produtividade de grãos.

TABELA 12. Teor de potássio disponível extraído pelo Mehlich-1 nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Antes dos cultivos	Cultivo ⁽¹⁾						CV
			1	2	3	4	5	6	
			----- mg kg ⁻¹ -----						(%)
+K	LVEf	147 aA	-	121 cA	-	141 bA	-	145 aA	8,22
	LVd	72 fB	-	153 aA	-	150 aA	-	152 aA	
	LVAe	64 fB	-	95 eA	-	91 eA	-	92 dA	
	LVAd	63 fB	-	118 cA	-	120 cA	-	110 cA	
	NVEf	117 cC	-	154 aA	-	156 aA	-	138 bB	
	NVe	83 eB	-	120 dA	-	122 dA	-	106 dA	
	PVAd	58 gA	-	92 eA	-	86 eA	-	90 eA	
	PVAe	133 bB	-	150 aA	-	153 aA	-	145 aA	
	RRe	143 aB	-	161 aA	-	144 bA	-	146 aA	
	FX	73 fB	-	158 aA	-	153 aA	-	153 aA	
	GX	46 gB	-	146 bA	-	154 aA	-	150 aA	
CX	102 dC	-	122 cB	-	142 bA	-	135 bA		
	Média	92		133		134		130	
-K	LVEf	147 aA	-	29 dB	-	27 bB	-	25 bB	8,73
	LVd	72 fA	-	33 cB	-	26 bB	-	23 bB	
	LVAe	64 fA	-	22 eB	-	21 cB	-	20 cB	
	LVAd	63 fA	-	38 cB	-	29 bC	-	26 bC	
	NVEf	117 cA	-	67 aB	-	40 aC	-	36 aC	
	NVe	83 eA	-	37 cB	-	31 bB	-	28 bC	
	PVAd	58 gA	-	24 eB	-	14 cC	-	13 cC	
	PVAe	133 bA	-	54 bB	-	37 aC	-	32 aC	
	RRe	143 aA	-	62 aB	-	30 bC	-	30 aC	
	FX	73 fA	-	22 eB	-	18 cB	-	17 cB	
	GX	46 gA	-	25 dB	-	19 cB	-	15 cB	
CX	102 dA	-	30 dB	-	28 bB	-	26 bB		
	Média	92		37		27		24	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na- coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. - não determinado. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

Resultados semelhantes aos obtidos neste estudo foram evidenciados por Bortuluzzi et al. (2005) em experimento conduzido durante 11 anos sob um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Os referidos autores verificaram, no tratamento sem fertilização potássica,

que houve redução da disponibilidade de K no solo de 50 mg kg^{-1} , no início do experimento, para 38 mg kg^{-1} , no primeiro ano, e 30 mg kg^{-1} , no segundo ano. Por sua vez, no tratamento com fertilização potássica, os teores de K disponíveis do solo passaram de 50 mg kg^{-1} para 80 e 85 mg kg^{-1} , no primeiro e segundo ano, respectivamente. Após este período, os teores de K disponíveis, em ambos os tratamentos, mantiveram-se constantes ao redor de 30 e 90 mg kg^{-1} , respectivamente, sem e com fertilização potássica. Segundo os mesmos autores, a manutenção desses teores, por praticamente uma década e com cultivo de culturas anuais ávidas por K, pode ter sido assegurada pelo K considerado inicialmente como não-trocável, mas em um compartimento com maior capacidade de reposição do K para a solução do solo.

Os teores de K trocável do solo relativos às amostras de solo com (+K) e sem (-K) fertilização potássica, coletadas antes e após os cultivos são apresentados na tabela 13. De modo similar ao K disponível, a adição de fertilizante potássico aos solos, proporcionou aumentos significativos nos teores de K trocável, para a maioria dos solos estudados (Tabela 12). Cabe ressaltar que estes aumentos foram variáveis entre os solos, principalmente em função do teor inicial disponível no solo.

Os teores de K trocável antes dos cultivos variaram de 49 a 147 mg kg^{-1} (média de 96 mg kg^{-1}), após o segundo cultivo esses teores passaram de 106 a 182 mg kg^{-1} (média de 136 mg kg^{-1}), indicando um aumento médio de 42% . Após o quarto e sexto cultivo, os teores permaneceram constantes e variaram de 102 a 168 mg kg^{-1} (média de 144 mg kg^{-1}) e de 102 a 185 mg kg^{-1} (média de 143 mg kg^{-1}), representando um aumento em relação a média inicial de 50% e 49% , respectivamente. Evidência-se, após o segundo cultivo, que os teores de K disponível estabilizaram-se no patamar de 140 mg kg^{-1} . Presumindo que exista, também, um equilíbrio com o K não- trocável, é provável que ocorra, neste caso, o processo de adsorção específica de K^+ pela fase mineral do solo, conforme apresentado por Velde e Peck (2002). Esse processo será limitado aos minerais cuja estrutura é susceptível de receber K. Esse patamar é determinado, provavelmente, pela capacidade dos sítios de troca do complexo em adsorver K^+ , onde seu aumento somente é possível pelo incremento no número desses sítios.

Sem a fertilização potássica (-K), o teor de K trocável no solo diminuiu com os cultivos até um nível mínimo, que foi variável com o tipo de solo (Tabela 13). Os teores de K trocável antes dos cultivos variaram de 49 a 147 mg kg^{-1} (média de 96 mg kg^{-1}), após o segundo cultivo esses teores diminuíram para 24 a 87 mg kg^{-1} (média de 47 mg kg^{-1}), indicando uma redução média de 51% . Após o quarto e sexto cultivo, os teores de K trocável permaneceram constantes e variaram de 18 a 55 mg kg^{-1} (média de 32 mg kg^{-1}) e de 16 a 52 mg kg^{-1} (média de 30 mg kg^{-1}), representando uma redução em relação a média inicial de 67%

e 69%, respectivamente (Tabela 13). Verifica-se que os teores de K trocável estabilizaram-se ao patamar de 30 mg kg⁻¹, indicando que se alcançou um equilíbrio entre as formas de K trocável e não-trocável com um mínimo de K⁺ no sistema solo-planta.

TABELA 13. Teor de potássio trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Antes dos cultivos	Cultivo ⁽¹⁾						CV
			1	2	3	4	5	6	
			----- mg kg ⁻¹ -----						(%)
+K	LVEf	111 cB	-	145 bA	-	147 bA	-	165 aA	9,69
	LVd	70 dB	-	182 aA	-	168 aA	-	162 aA	
	LVAe	74 dB	-	106 cA	-	117 cA	-	131 bA	
	LVAd	87 dB	-	132 bA	-	102 cA	-	120 cA	
	NVEf	125 bB	-	123 cB	-	167 aA	-	179 aA	
	NVe	106 cB	-	113 cB	-	145 bA	-	102 cB	
	PVAd	49 eB	-	115 cA	-	125 cA	-	118 cA	
	PVAe	145 aB	-	161aA	-	145 bB	-	137 bB	
	RRe	147 aB	-	141 bB	-	160 aA	-	145 bB	
	FX	70 dB	-	163 aA	-	159 aA	-	155 bA	
	GX	55 eC	-	135 bB	-	164 aA	-	185 aA	
	CX	109 cB	-	116 cB	-	134 bA	-	121 cB	
	Média	96			136		144		
-K	LVEf	111 cA	-	41 dB	-	34 cC	-	33 bC	8,97
	LVd	70 dA	-	50 cB	-	32 cC	-	31 bC	
	LVAe	74 dA	-	38 dB	-	24 dC	-	26 cC	
	LVAd	87 dA	-	39 dB	-	27 cB	-	27 cB	
	NVEf	125 bA	-	86 aB	-	55 aC	-	52 aC	
	NVe	106 cA	-	41 dB	-	33 cC	-	28 cC	
	PVAd	49 eA	-	24 fB	-	18 dB	-	16 dB	
	PVAe	145 aA	-	66 bB	-	44 bC	-	48 aC	
	RRe	147 aA	-	87 aB	-	35 cC	-	34 bC	
	FX	70 dA	-	24 fB	-	24 dB	-	20 dC	
	GX	55 eA	-	37 dB	-	21 dC	-	20 dC	
	CX	109 cA	-	31 eB	-	32 cB	-	26 cB	
	Média	96			47		32		

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. – não determinado. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

Lana e Neves (1994) também verificaram que os teores de K trocável, decresceram com os cultivos. O K trocável reduziu, em média, de 29 para 14 mg kg⁻¹ (52%) após o quarto cultivo de eucalipto. De modo similar, Ernani et al. (2002) observaram em sete anos de experimento, que o teor de K trocável do solo diminuiu de 140 mg kg⁻¹ no primeiro ano para

40 mg kg⁻¹ no quinto ano e que após isso, os teores permaneceram constantes. Os autores atribuíram esses resultados ao efeito tamponante de formas não-trocáveis de K do solo, as quais liberaram K e com isso os teores de K trocável do solo permaneceu inalterado a partir do quinto ano de avaliação. Resultados semelhantes foram obtidos por Nachtigall e Vahl (1991b), Melo (1998) e Kaminski et al. (2007).

Os maiores teores de K trocável mantidos nos solos NVef (52 mg kg⁻¹) e no PV Ae (48 mg kg⁻¹), podem ser explicados devido estes solos apresentarem maior PTK (Tabela 8) e maior CTC (Tabela 3). Segundo Ernani et al. (2007), solos que apresentam maior PTK possuem maior capacidade de suprimento de potássio. Por sua vez, solos com maior CTC necessitam de maior quantidade de K para atingirem a mesma saturação por este nutriente no solo (VILLA et al., 2004). Por outro lado, os menores teores de K trocável (16 mg kg⁻¹) mantidos no solo PV Ad é em decorrência dos menor valor de PTK (Tabela 8) e CTC (Tabela 3) desse solo.

No presente estudo os teores médios de 30 e 140 mg kg⁻¹ de K trocável estabelecem os limites inferiores e superiores, do equilíbrio, no caso de escassez e excesso de K no sistema, respectivamente. Segundo Velde e Peck (2002) estes limites são determinados principalmente, pela mineralogia dos solos.

Os resultados de K trocável e não-trocável no solo obtidos no ensaio sem fertilização potássica (Tabelas 11 e 13) confirmam as tendências já relatadas por Mielniczuck e Selbach (1978), Patella (1980), Rosolem et al. (1988), Nachtigall e Vahl (1989), Nachtigall e Vahl (1991a,b), Rosolem et al. (1993), Castilhos e Meurer (2002), Bortoluzzi et al. (2005), Brunetto et al. (2005), Kaminski et al. (2007) permanecendo o postulado de que formas de K não-trocáveis, ao longo do tempo, podem manter estáveis as formas de K trocáveis no solo.

Entretanto, caso a demanda por K continue até a exaustão dessas formas, o K poderá ainda ser repostado pela fração mineral mais grosseira, como os feldspatos potássicos da fração areia, provavelmente em quantidades insuficientes para o crescimento vegetal satisfatório (SPARKS, 1986; MEURER et al., 1996). A manutenção desta situação por longos períodos pode diminuir os teores de K não-trocável e comprometer a reposição deste à solução do solo e o estabelecimento de plantas cultivadas.

Em experimentos de longa duração, Borkert et al. (1997a,b) também observaram que houve diminuição nos teores de K trocável, em diferentes tipos de solo, no transcorrer de dez anos de cultivo de soja, e constataram que são necessárias adubações potássicas para evitar o esgotamento das reservas de K do solo, recomendando-se de 80 a 150 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados anualmente, dependendo do tipo de solo. De modo similar, Rosolem et al. (1984)

em estudo conduzido sob Latossolo Vermelho arenoso, notaram um acentuado decréscimo nos teores de K trocável do solo, no transcorrer de cultivos sucessivos de soja, e afirmaram ser necessária a utilização de, no mínimo, 80 kg ha⁻¹ de K₂O por ano, para manter um teor estável de K trocável no solo.

Os teores de K na solução do solo relativos às amostras de solo com (+K) e sem (-K) fertilização potássica, coletadas antes e após os cultivos são apresentados na tabela 14.

TABELA 14. Teor de potássio na solução dos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Antes dos cultivos	Cultivo ⁽¹⁾						CV
			1	2	3	4	5	6	
			----- mg kg ⁻¹ -----						
+K	LVEf	85 cB	-	94 cA	-	97 bA	-	102 bA	15,53
	LVd	44 dC	-	145 aA	-	122 aB	-	113 aB	
	LVAe	39 dB	-	98 cA	-	64 cB	-	66 dB	
	LVAd	123 aA	-	69 dB	-	94 bB	-	86 cB	
	NVEf	81 cA	-	96 cA	-	104 bA	-	92 cA	
	NVe	93 cA	-	93 cA	-	69 cA	-	98 bA	
	PVAd	46 dA	-	73 dA	-	67 cA	-	69 dA	
	PVAe	87 cB	-	104 cA	-	126 aA	-	104 bA	
	RRe	108 bB	-	116 bA	-	128 aA	-	108 bB	
	FX	28 eC	-	58 eB	-	95 bA	-	89 cA	
	GX	46 dB	-	104 cA	-	123 aA	-	117 aA	
	CX	94 cA	-	102 cA	-	100 bA	-	105 bA	
	Média	73		94		98		96	
-K	LVEf	85 dA	-	36 bB	-	22 aC	-	20 aC	8,45
	LVd	44 eA	-	28 cB	-	20 aC	-	18 aC	
	LVAe	39 eA	-	18 dB	-	16 cB	-	15 bB	
	LVAd	123 aA	-	31 cB	-	15 cC	-	13 cC	
	NVEf	81 dA	-	29 cB	-	24 aC	-	22 aC	
	NVe	93 cA	-	17 dB	-	16 cB	-	15 bB	
	PVAd	46 eA	-	16 dB	-	9 dC	-	10 cC	
	PVAe	87 dA	-	44 aB	-	23 aC	-	16 bD	
	RRe	108 bA	-	42 aB	-	20 bC	-	19 aC	
	FX	28 fA	-	11 eB	-	13 cB	-	10 cB	
	GX	46 eA	-	20 dB	-	13 cC	-	10 cC	
	CX	94 cA	-	20 dB	-	19 bB	-	19 aB	
	Média	73		26		18		16	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. - não determinado. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

De modo similar ao K disponível e trocável, a adição de fertilizante potássico aos solos (+K), proporcionou aumentos significativos nos teores de K na solução, para a maioria dos solos estudados (Tabela 14). Resultados estes já esperado em virtude de que estas três formas encontram-se em equilíbrio dinâmico no solo. Os teores de K em solução antes dos cultivos variaram de 28 a 123 mg kg⁻¹ (com média de 73 mg kg⁻¹), após do segundo cultivo esses teores passaram para 73 a 145 mg kg⁻¹ (média de 94 mg kg⁻¹), indicando um aumento médio de 29%. Após o quarto e sexto cultivos, os teores permaneceram constantes e variaram de 64 a 128 mg kg⁻¹ (média de 98 mg kg⁻¹) e de 66 a 117 mg kg⁻¹ (média de 96 mg kg⁻¹), representando um aumento em relação a média inicial de 34% e 32%, respectivamente.

O teor de K na solução do solo, no ensaio sem fertilização potássica, antes dos cultivos, variaram de 28 a 123 mg kg⁻¹ (média de 73 mg kg⁻¹), após o segundo cultivo esses teores diminuíram de 11 a 44 mg kg⁻¹ (média de 26 mg kg⁻¹), indicando uma redução média de 64%. Após o quarto e sexto cultivo, os teores de K na solução permaneceram constantes e variaram de 9 a 23 mg kg⁻¹ (média de 18 mg kg⁻¹) e de 10 a 22 mg kg⁻¹ (média de 16 mg kg⁻¹), representando uma redução em relação a média inicial de 75% e 78%, respectivamente. Evidencia-se que se alcançou um equilíbrio entre as formas de K em solução e trocável com um mínimo de K solúvel no sistema solo-planta.

4.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ABSORÇÃO DE POTÁSSIO PELAS PLANTAS

Os dados obtidos para a produção de matéria seca da parte aérea das plantas nos seis cultivos em casa de vegetação são apresentados na tabela 15. Independentemente da adição de fertilizante potássico, a produção de matéria seca foi diferente entre os solos, em todos os cultivos, demonstrando que os solos possuem capacidade de produção distinta.

As diferenças na produção de matéria seca entre as espécies (cultivos) é explicada por suas diferentes habilidades em absorver potássio, quer pela área do sistema radicular ou pela taxa de absorção por unidade de superfície radicular (BARBER e SILBERBUSH, 1984). Essa habilidade é inerente à espécie e dependente da sua capacidade de resposta ao estresse nutricional, desencadeando mecanismos para contornar o problema de baixa disponibilidade de potássio (MARSCHNER, 1995; RHAGHOTHAMA, 1999).

TABELA 15. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	Cultivo ⁽¹⁾						Total	CV
		1	2	3	4	5	6		
		----- g por vaso -----							%
+K	LVEf	18,4 aC	37,2 cB	17,9 aC	19,0 aC	18,1 aC	48,5 bA	159,1	12,47
	LVd	13,4 bC	36,7 cB	10,0 bD	16,1 bB	15,2 bB	45,1 cA	136,5	
	LVAe	17,4 aD	43,8 bB	13,4 bD	21,1 aC	15,9 bD	55,8 aA	167,4	
	LVAd	13,8 bD	41,4 bB	11,5 bD	22,5 aC	15,7 bD	50,5 bA	155,4	
	NVEf	13,0 bD	39,0 cB	17,7 aC	20,3 aC	13,8 bD	46,0 cA	149,8	
	NVe	18,9 aC	47,8 aB	17,7 aC	21,6 aC	20,1 aC	58,0 aA	184,1	
	PVAd	13,6 bB	37,7 cA	10,1 bC	7,6 cC	15,0 bB	18,4 eB	102,4	
	PVAe	19,7 aC	48,5 aB	18,9 aC	21,1 aC	20,7 aC	56,2 aA	185,1	
	RRe	18,9 aD	38,1 cB	18,7 aD	24,3 aC	20,5 aD	46,0 cA	166,5	
	FX	8,2 cC	41,1 bA	12,8 bB	14,1 bB	18,6 aB	39,3 dA	134,1	
	GX	14,4 bC	34,9 dB	17,6 aC	18,0 aC	13,7 bC	56,4 aA	155,0	
	CX	14,4 bD	43,8 bB	12,9 bD	19,4 aC	14,9 bD	52,2 bA	157,6	
	Média	15,3	40,8	14,9	18,8	16,9	47,7		
-K	LVEf	18,1 aB	31,4 aA	7,6 cC	5,2 aD	2,3 aE	3,6 cE	68,2 (43) ⁽²⁾	18,75
	LVd	12,9 bA	16,0 eA	6,9 cB	2,7 bC	1,9 aC	5,9 bB	46,3 (34)	
	LVAe	14,7 bA	19,0 dA	3,2 eC	3,5 bC	1,3 aC	8,2 aB	49,9 (30)	
	LVAd	13,0 bB	18,1 dA	4,7 dC	5,8 aC	2,0 aD	3,9 cC	47,5 (31)	
	NVEf	12,6 bB	28,6 bA	10,1 bC	5,3 aD	2,2 aE	6,9 bD	65,7 (44)	
	NVe	18,8 aA	23,7 cA	5,0 dB	3,4 bB	1,4 aC	4,0 cB	56,3 (31)	
	PVAd	12,1 bA	11,2 fB	2,2 eC	1,6 bC	0,9 aC	2,0 cC	30,0 (29)	
	PVAe	19,6 aB	27,6 bA	12,6 aC	7,2 aD	3,0 aE	9,1 aD	79,1 (43)	
	RRe	17,2 aB	29,1 bA	11,2 cC	6,7 aC	2,8 aD	10,0 aC	74,0 (44)	
	FX	7,0 cA	9,3 fA	5,6 dA	2,9 bB	1,4 aB	4,1 cB	30,3 (23)	
	GX	11,2 bB	19,2 dA	4,6 dC	2,6 bD	1,3 aD	3,8 cC	42,7 (28)	
	CX	14,0 bB	33,1 aA	4,0 dD	7,0 aC	2,2 aD	4,6 cD	64,9 (41)	
	Média	14,3	22,2	6,2	4,5	1,9	5,5		

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. ⁽²⁾ Número entre parênteses representa a produção percentual de matéria seca acumulada nos seis cultivos no ensaio sem fertilização potássica em comparação ao ensaio com fertilização potássica (100%). (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho distrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

A produção de matéria seca das plantas, independentemente da adição ou não de fertilizante potássico, foi maior no solo PVAe nos seis cultivos (Tabelas 15 e Figura 3). Isto reflete a maior disponibilidade de potássio mantida no solo durante os cultivos (Tabelas 13 e 14) e o maior PTK (Tabela 8) desse solo, corroborando com Ernani et al. (2007), os quais relatam que solos com maior PTK possuem maior capacidade de reposição de K na solução, à medida que o K é adicionado ou retirado do solo.

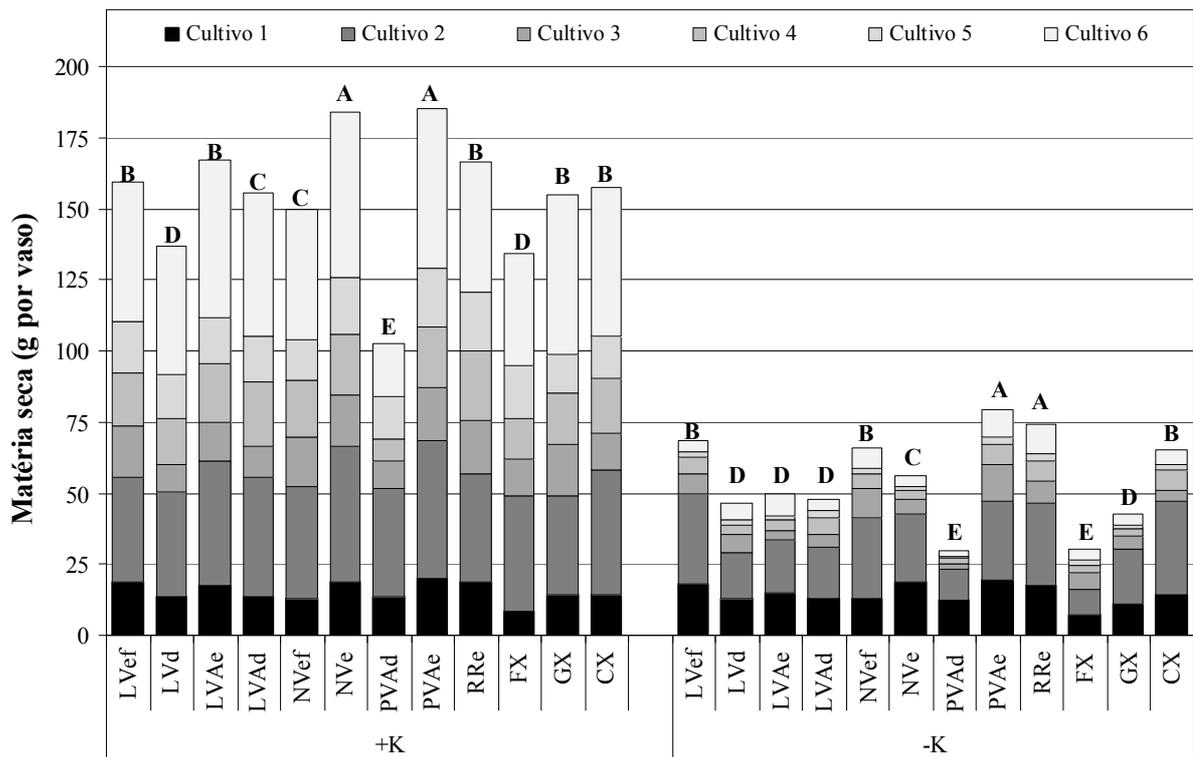


FIGURA 3. Produção de matéria seca acumulada nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.

Barra seguida da mesma letra, dentro de cada ensaio, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVD = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVE = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Por outro lado, a menor produção de matéria seca obtida para o solo PVAd, tanto com e sem adição de potássio (Tabela 15 e Figura 3), deve-se ao menor PTK desse solo (Tabela 8), corroborando com Villa et al. (2004). Solos que apresentam menor PTK, indicam que, quando o K é absorvido da solução do solo pelas plantas, a capacidade de repô-lo também é reduzida, de modo que, se nenhuma adubação for realizada ao longo dos cultivos sucessivos haverá deficiência deste nutriente, conforme evidenciado neste estudo.

Os teores de K na matéria seca das plantas com (+K) e sem (-K) aplicação de potássio, nos seis cultivos realizados em casa de vegetação são apresentados na tabela 16. Verifica-se que, independentemente da adição ou não de fertilizante potássico, que os teores de K variaram em função dos solos e dos cultivos. Resultados estes devido a grande variabilidade da disponibilidade apresentada pelos solos e da eficiência de absorção das plantas.

A absorção de potássio pelas plantas durante os seis cultivos (Tabela 16) mostra que no ensaio com fertilização potássica, os teores de K no tecido foliar situam-se na faixa

considerada adequada. Segundo Malavolta et al. (1997) a faixa de teores adequados de potássio para a soja é de 17 a 25 g kg⁻¹, para o milho de 15 a 35 g kg⁻¹, para o trigo de 15 a 30 g kg⁻¹, para o feijão de 20 a 25 g kg⁻¹, para o milho de 17 a 35 g kg⁻¹. Ressalta-se que nos cultivos 3, 4 e 6 (trigo, feijão e milho, respectivamente) os teores ficaram pouco acima do nível superior, indicando que houve consumo de luxo.

TABELA 16. Teor de potássio na matéria seca das plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) aplicação de potássio

Ensaio	Solo	Cultivo ⁽¹⁾						CV
		1	2	3	4	5	6	
		----- g kg ⁻¹ -----						%
+K	LVEf	21,2 bB	30,9 aA	31,7 aA	33,0 bA	21,6 aB	36,4 aA	10,30
	LVd	25,0 bB	34,8 aA	33,6 aA	36,9 aA	22,2 aB	36,9 aA	
	LVAe	21,8 bC	31,0 aB	29,9 aB	27,1 bC	22,2 aD	36,3 aA	
	LVAd	22,3 bB	36,6 aA	34,6 aA	41,6 aA	23,3 aB	42,7 aA	
	NVEf	20,8 bC	30,9 aB	32,6 aB	41,8 aB	21,1 aC	37,2 aA	
	NVe	23,6 bC	32,9 aB	31,8 aB	41,6 aA	22,7 aC	41,6 aA	
	PVAd	23,9 bD	31,7 aC	28,4 aC	42,7 aA	21,2 aD	38,0 aB	
	PVAe	21,7 bC	31,6 aB	32,4 aB	39,6 aA	20,9 aC	36,1 aA	
	RRe	21,6 bC	31,5 aB	32,4 aB	40,4 aA	22,2 aC	36,6 aA	
	FX	30,0 aC	36,3 aB	31,9 aC	41,4 aA	23,0 aD	35,1 aB	
	GX	21,5 bC	31,1 aB	31,8 aB	38,6 aA	21,9 aC	36,9 aA	
	CX	19,4 bB	28,8 aA	31,2 aA	29,7 bA	21,3 aB	33,7 aA	
	Média		22,7	32,3	31,9	37,9	22,0	
-K	LVEf	20,2 bA	33,9 aA	18,7 bB	19,0 aB	7,0 bC	13,9 aC	11,36
	LVd	19,8 bA	32,8 bA	17,8 bB	19,6 aB	6,2 bC	8,5 bD	
	LVAe	20,0 bA	32,4 bA	18,0 bC	20,6 aB	6,1 bD	9,6 bD	
	LVAd	22,5 aA	36,2 aA	20,0 aB	18,8 aB	8,0 aB	8,9 bC	
	NVEf	19,2 cA	33,2 bA	20,1 aB	19,1 aB	8,1 aB	17,3 aB	
	NVe	17,4 cA	30,6 cA	17,8 bB	16,4 bB	6,2 bB	8,5 bC	
	PVAd	22,3 aA	35,2 aA	18,0 bC	20,2 aB	6,4 bC	4,2 bD	
	PVAe	20,8 bA	35,1 aA	21,0 aB	19,4 aC	8,8 aC	17,3 aC	
	RRe	20,9 bA	35,0 aA	21,3 aB	19,2 aB	8,3 aB	17,6 aB	
	FX	18,9 cA	31,9 bA	17,9 bC	19,8 aB	6,3 bD	8,9 bE	
	GX	17,8 cA	30,5 cA	17,0 bC	18,7 aB	5,6 bC	15,2 aC	
	CX	20,4 bA	32,1 bA	16,8 bB	18,2 aB	5,7 bC	7,7 bD	
	Média		20,0	33,2	18,7	19,1	6,9	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

No ensaio sem a fertilização potássica (-K) houve decréscimo nos teores de K das plantas após o segundo cultivo em decorrência da grande depleção das formas prontamente disponíveis no solo (Tabelas 12 e 13), porém, deve-se ressaltar que não se trata da mesma

espécie, e estas possuem capacidade distinta na absorção de nutrientes. Nos cultivos 4, 5 e 6 (feijão, soja e milho, respectivamente), os teores de potássio, em todos os solos, situaram-se abaixo da faixa de suficiência.

Sem adição de fertilizante potássico, para a maioria dos solos estudados, foram observadas deficiências de potássio, após o terceiro cultivo (Apêndice 4). Fato este atribuído à maior extração de potássio pelas plantas nos dois cultivos anteriores (Figura 4), diminuindo a disponibilidade de K no solo para os cultivos subsequentes (Tabelas 12 e 13).

O comportamento das plantas nos seis cultivos em casa de vegetação mostrou que, mesmo com baixa disponibilidade de potássio no solo há crescimento, mas de forma diferenciada e dependente da capacidade da planta adaptar-se ao nível de estresse nutricional (Apêndice 5). Porém, a produção das plantas é sensivelmente afetada pelos baixos teores de potássio no solo (Apêndice 6), sendo incompatível com sistemas de produção agrícola baseados em altas produtividades. Assim, a utilização de solos com baixa disponibilidade de potássio sem a adição de fertilizantes só é possível em sistemas agrícolas de baixo nível tecnológico e/ou sem fins comerciais.

As quantidades de K acumuladas na matéria seca das plantas com (+K) e sem (-K) fertilização potássica, nos seis cultivos realizados em casa de vegetação são apresentados na tabela 17. A baixa capacidade de suprimento de K às plantas ao longo dos cultivos são em decorrência da grande depleção das formas disponíveis do solo, e corroboram com as evidências de Kaminski et al. (2007), os quais demonstraram que a capacidade de suprimento de K depende mais do K recém-adicionado do que do seu histórico de adubação potássica do solo.

A absorção de potássio pelas plantas nos seis cultivos variou em função da cultura e da adição de fertilizante potássico (Figura 4). Com a fertilização potássica (+K), os cultivos onde ocorreram as maiores quantidades de potássio absorvido foram aqueles com milho (cultivo 2) e milho (cultivo 6), sendo esse resultado devido à combinação das maiores produções de matéria seca e teores de potássio no tecido vegetal (Tabela 16 e Figura 3). A habilidade do feijão em absorver potássio também foi alta, pois os teores de potássio na matéria seca foram os mais altos, comparativamente com as outras espécies. Por outro lado, se pode confirmar a baixa eficiência da soja na absorção de potássio, onde os teores de K na matéria seca foram os mais baixos do que para as outras espécies (Tabela 16).

TABELA 17. Conteúdo de potássio absorvido pelas plantas nos seis cultivos realizados nos solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) aplicação de potássio

Dose	Solo	Cultivo ⁽¹⁾						CV
		1	2	3	4	5	6	
		----- mg por vaso -----						%
	LVEf	389 aD	1.147 bB	568 aC	622 cC	390 aD	1.765 cA	
	LVd	333 bD	1.278 bB	335 bD	593 cC	337 bD	1.661 cA	
	LVAe	380 aD	1.357 bB	401 bD	567 cC	350 bD	2.012 bA	
	LVAd	307 bD	1.515 aB	398 bD	936 cC	350 bD	2.156 aA	
	NVEf	271 bD	1.203 bB	577 aC	849 cC	290 bD	1.703 cA	
	NVe	448 aD	1.571 aB	561 aD	899 aC	451 aD	2.428 aA	
+K	PVAd	324 bC	1.189 bA	289 bC	324 dC	319 bC	700 eB	14,16
	PVAe	425 aE	1.533 aB	614 aD	832 bC	431 aE	2.016 bA	
	RRe	410 aE	1.197 bB	605 aD	976 aC	451 aE	1.684 cA	
	FX	248 cD	1.489 aA	407 bC	578 cB	428 aC	1.381 dA	
	GX	308 bD	1.086 cB	558 aC	692 cC	299 bD	2.075 bA	
	CX	278 bD	1.264 bB	401 bD	574 cC	318 bD	1.743 cA	
	Média	343	1.319	476	704	368	1.777	
	LVEf	365 bB	1064 aA	142 bC	99 aC	16 aC	50 bC	
	LVd	254 dA	524 dA	123 bB	53 bB	12 bB	50 bB	
	LVAe	299 cA	615 dA	58 cB	72 aB	8 bB	78 aB	
	LVAd	292 cB	654 cA	94 bC	109 aC	16 aC	35 bC	
	NVEf	241 dB	951 bA	203 aC	101 aD	17 aD	119 aD	
	NVe	326 cA	725 cA	89 bB	56 bB	9 bB	34 bB	
-K	PVAd	270 dA	393 eB	40 cC	32 bC	6 aC	8 cC	23,54
	PVAe	408 aB	969 bA	265 aC	140 aD	26 aD	157 aD	
	RRe	361 bB	1018 aA	239 aC	129 aC	23 aD	176 aC	
	FX	130 fA	297 fA	100 bB	57 bB	9 bB	37 bB	
	GX	198 eB	586 dA	78 cC	49 bC	7 bC	58 bC	
	CX	285 cB	1063 aA	67 cC	127 aC	13 bC	35 bC	
	Média	286	738	125	85	14	70	

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. Média seguida da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Sem a fertilização potássica (-K) a maior absorção de potássio pelas plantas, ocorreu no primeiro e, principalmente, no segundo cultivo com milho (Figura 4). Fato este devido a depleção das formas mais prontamente disponíveis que ocorreram ao final do segundo cultivo (Tabelas 12, 13 e 14). É possível identificar dois fatores primordiais para justificar essa maior absorção de potássio no segundo cultivo: em primeiro lugar, segundo Pereira-Filho et al. (2005), resultados experimentais e práticos caracterizam o milho como uma verdadeira “bomba” recicladora de nutrientes, por apresentar elevada capacidade de extrair nutrientes do solo, quando comparado a várias outras culturas agrícolas. Em segundo lugar, a maior

produção de matéria seca desta cultura que também foi influenciada pelo número de plantas cultivadas por vaso (Tabela 6).

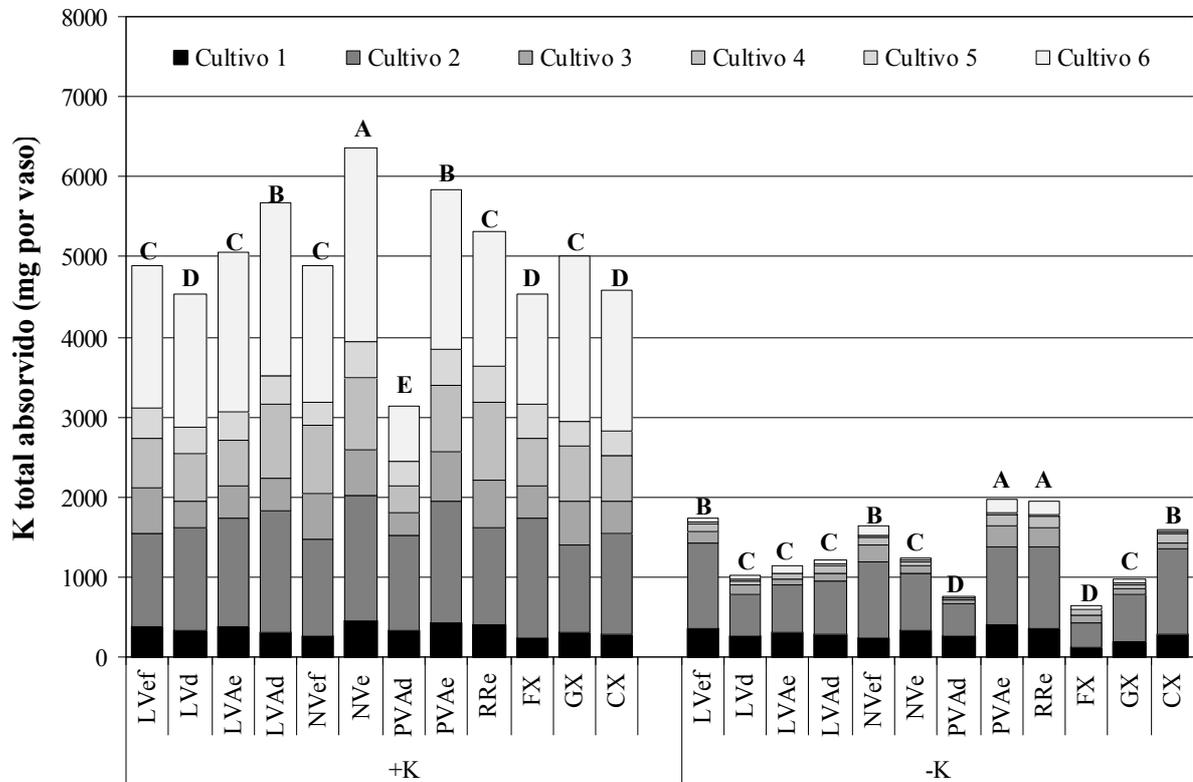


FIGURA 4. Potássio total absorvido em cada cultivo e acumulado na parte aérea das plantas nos diferentes solos coletados no Estado do Paraná com (+K) e sem (-K) fertilização potássica.

Barra seguida da mesma letra, dentro de cada ensaio, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVD = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

Na tabela 18 são apresentados os teores de K trocável antes e após os seis cultivos, a quantidade de K liberada durante os cultivos (K trocável + K adicionado pelo fertilizante), o K total absorvido pelas plantas e a contribuição da forma não-trocável na nutrição das plantas.

A capacidade de liberação de K da forma trocável foi bastante variável entre os solos durante os seis cultivos (Tabela 18). As quantidades liberadas, no ensaio com adição de fertilizante potássico, variaram de 3.117 a 5.787 mg por vaso. Ao passo que, no ensaio sem fertilização potássica, as quantidades liberadas da forma trocável variaram de 275 a 941 mg por vaso. Esses elevados valores de K trocável liberado, no ensaio com a fertilização potássica (+K) (Tabela 18), deve-se ao fato do potássio adicionado pelo fertilizante ser considerado trocável como proposto por Castilhos et al. (2002).

A quantidade de potássio da forma trocável liberada durante os cultivos, não foi suficiente para atender à demanda por K das plantas, exceto para o solo GX no ensaio com adição de fertilizante potássico (Tabela 18). De modo que a quantidade absorvida pelas culturas foi maior do que a liberada da forma trocável, ocorrendo desta forma a contribuição na forma não-trocável na nutrição das plantas.

TABELA 18. Teores de K trocável nos solos coletados no Estado do Paraná antes e após os cultivos, quantidade total de potássio liberada e absorvida durante o experimento e contribuição da forma não-trocável com (+K) e sem (-K) fertilização potássica

Ensaio	Solo	K trocável			K total absorvido	Contribuição da forma não-trocável	
		Inicial	Final	Liberado			
		----- mg kg ⁻¹ -----			----- mg por vaso -----		%
+K	LVef	111	165	4464 ⁽¹⁾	4.881	417 ⁽²⁾	8,5
	LVd	70	162	4303	4.537	234	5,2
	LV Ae	74	131	4855	5.067	212	4,2
	LV Ad	87	120	5474	5.662	188	3,3
	NVef	125	179	4748	4.893	145	3,0
	NVe	106	102	5231	6.358	1.127	17,7
	PV Ad	49	118	3117	3.145	28	0,9
	PV Ae	145	137	5787	5.851	64	1,1
	RRe	147	145	4851	5.323	472	8,9
	FX	70	155	4142	4.531	389	8,6
	GX	55	185	5726	5.018	-	-
CX	109	121	3924	4.578	654	14,3	
-K	LVef	111	33	614	1.736	1.122	64,6
	LVd	70	31	275	1.016	741	72,9
	LV Ae	74	26	436	1.130	694	61,4
	LV Ad	87	27	585	1.200	615	51,2
	NVef	125	52	575	1.632	1.057	64,8
	NVe	106	28	502	1.239	736	59,5
	PV Ad	49	16	376	749	373	49,8
	PV Ae	145	48	793	1.964	1.171	59,6
	RRe	147	34	941	1.946	1.005	51,7
	FX	70	20	353	630	278	44,1
	GX	55	20	305	975	671	68,8
CX	109	26	753	1.591	838	52,7	

⁽¹⁾ Valores calculados pela subtração entre o valor inicial e final da forma trocável + o total adicionado pelo fertilizante potássico (Apêndice 3), multiplicado pelo volume de solo (7,5 dm³) e a densidade do respectivo solo (Tabela 3). ⁽²⁾ Valores calculados pela subtração entre o valor de K total absorvido e o liberado. (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LV Ae = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LV Ad = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PV Ad = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PV Ae = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

Diversos trabalhos têm demonstrado expressiva contribuição de formas não-trocáveis de K na nutrição das plantas (PATELLA, 1980; RICHARDS et al., 1988; NACHTIGALL e VAHL, 1991a,b; MELO et al., 1995; SILVA et al., 1995; FRAGA et al., 2009). Essa fração

pode ser absorvida pelos vegetais, fazendo com que, em determinados solos a omissão da adubação potássica não resulte em redução na produção (ROSOLEM et al., 1993; MENGEL RAHMATULLAH, 1994). Silva et al. (1995), trabalhando com um Latossolo Roxo álico (LRa) sem adubação potássica, durante dez anos com soja-trigo, verificaram que do teor total de K reduzido do solo, 72,6% eram provenientes de formas não trocáveis do elemento e que a contribuição da forma não-trocável foi de 82,1% do total absorvido.

O K não-trocável contribuiu, de forma bastante significativa, para o K absorvido, variando entre 0 a 1.127 mg por vaso no ensaio com fertilização potássica e de 278 a 1.171 mg kg⁻¹ no ensaio sem adição deste nutriente.

Com a fertilização potássica a contribuição da forma não-trocável representou de 0 a 17,7%. Evidenciando desta forma que mesmo com adições periódicas de fertilizante potássico a forma não trocável também contribui no fornecimento de potássio, exceto para o solo GX. Entretanto, cabe resaltar que ao se analisar a tabela 10, observa-se que, no ensaio com adição de potássio, houve um aumento nos teores de K não-trocável na maioria dos solos. Sugerindo, de certa forma, que outras formas de K não extraídas pelo HNO₃ podem contribuir para o suprimento de K nas plantas ou que existam formas de K no solo não consideradas na descrição clássica de seu comportamento no solo.

Fernandes et al. (1993), estudando a nutrição de soja e formas de K num Latossolo, constataram que o K disponível à soja foi também proveniente do K extraído pelo HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente, considerado como trocável e não-trocável. Esses autores concluíram que a classificação do K do solo em trocável e não-trocável não foi adequada para explicar a nutrição da soja no Latossolo.

Segundo Rosolem et al. (1993), Silva et al. (1995) e Kaminski et al. (1996), o K extraído pelo HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente não explicou, de modo satisfatório, a dinâmica da forma K não-trocável do solo. Meurer et al. (1996), em estudo sobre formas de K em solos do Rio Grande do Sul, comentaram que o HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente, utilizado para quantificar o K não-trocável nesses solos, apresentava capacidade para dissolver o K da estrutura dos minerais, similarmente como outros ácidos fortes, o que pode resultar numa superestimação dos teores de K não-trocável no solo.

Sem a adição de fertilizante potássico a contribuição da forma não trocável, para o K absorvido, representou de 44,1% a 72,9% (Tabela 18). Resultados semelhantes foram evidenciados por Lana e Neves (1994) em solos de São Paulo. Em experimento sem adição de fertilizante potássico, os autores verificaram que a contribuição do K não-trocável variou de 50% a 81% do total de potássio absorvido, após quatro cultivos de eucalipto.

Rosolem et al. (1993), estudando a intensidade de liberação do K não-trocável em cinco tipos de solos na presença e ausência de adubação potássica, constataram que a forma não-trocável, independente do solo, foi a principal fonte de K para a soja.

Em experimento de campo, realizado num Planossolo de Rio Grande do Sul, Simonete (1998) estimou que, mesmo considerando o efeito residual da adubação potássica do azevém na cultura do arroz irrigado subsequente, houve contribuição da forma não-trocável de pelo menos 29% do potássio total absorvido pelas plantas.

Os resultados obtidos no presente estudo indicam que o K trocável não foi à única forma do elemento no solo que supriu o nutriente às plantas, ocorrendo contribuição de formas de K não-trocáveis. Isto pode explicar a falta de resposta das culturas à adição de fertilizantes potássicos, observada em experimentos de campo (BORKERT et al., 1993; SCHERER, 1998; BRUNETTO et al., 2005), mesmo em solos com teor de K trocável considerado médio ou baixo (ROSOLEM et al., 1993; VEDUIN, 1994).

Segundo Gommers et al. (2005) como os mecanismos que controlam a absorção de K nas plantas superiores são eficientes, principalmente em baixas concentrações na solução do solo, resulta em forte gradiente químico em direção a rizosfera, criando um ambiente favorável à liberação do K de formas não-trocáveis. No entanto, cabe ressaltar que essa situação pode comprometer a preservação dessas formas no solo a médio prazo, além de provocar, inclusive, alterações em fases de minerais que contêm K, como observado por Bortoluzzi et al. (2005). Assim, o correto planejamento e manejo da adubação potássica, torna-se de extrema importância, na preservação da fração não-trocável e na manutenção de níveis adequados de disponibilidade de potássio para o estabelecimento das culturas.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

Os solos apresentam teores de K total de 547 a 15.563 mg kg⁻¹, teor de K não-trocável de 134 a 567 mg kg⁻¹, K trocável de 49 a 151 mg kg⁻¹ e K solução de 39 a 113 mg kg⁻¹. Esta variação ocorreu em função do material de origem, e para um mesmo material de origem houve influência do grau de intemperismo do solo.

Os solos apresentam poder tampão de potássio variando de 1,28 a 12,79 (mmol_c kg⁻¹)/(mmol L⁻¹)^{0,5}. Esta variação ocorreu, principalmente, em função da textura dos solos.

O poder tampão de potássio dos solos PVAd, FX e CX são baixos, indicando que as adubações deverão ser realizadas em doses menores e mais frequentes de forma a minimizar as perdas de K por lixiviação.

Após o segundo cultivo os teores de K trocável mantiveram-se constantes com valores médios de 141 e 36 mg kg⁻¹, com e sem a adição de fertilizante potássico, respectivamente.

Os teores de K não-trocável foram incrementados com a adição de fertilizantes potássicos, indicando a ocorrência de fixação do nutriente.

Os solos diferiram quanto à sua capacidade de suprir K para as plantas, avaliada pela quantidade do nutriente acumulado nas plantas. A capacidade de suprimento do potássio decresceu na seqüência: PVAe = RRe > LVe_f = NVe_f = CX > NVe = LVAd = LVAe = LV = GX > FX = PVAd.

As formas prontamente disponíveis e o poder tampão de potássio foram os parâmetros que mais contribuíram para a absorção desse elemento pelas plantas.

A contribuição da forma de K não-trocável durante os seis cultivos variou de 0 a 17,7% com adição de fertilizante potássico e de 44,1% a 72,9% sem adição de fertilizante potássico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KANANI, T.; MACKENZI, A.F.; ROSS, G.J. Potassium status of some Quebec Soils: K release by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. **Canadian Journal of Soil Science**, v.64, n.8, p.99-106, 1984.

BARBER, S. A.; SILBERBUSH, M. Plant root morphology and nutrient uptake. In: BARBER, S. A.; BOULDIN, D. R. (Eds.). **Roots, nutrient and water influx, and plant growth**. SSSA, Madison, p.65-88, 1984.

BECKETT, P.H.T. Studies on soil potassium. II. The “immediated” Q/I relations of labile potassium in the soil. **Journal of Soil Science**, v.15, p.9-23, 1964.

BECKETT, P.H.T.; NAFADY, M.H.M. Studies on soil potassium. VI. The effect of K-fixation and release on the form of the K: (Ca + Mg) exchange isotherm. **Journal of Soil Science**, v.18, p.244-262, 1967.

BORKERT, C.M., SFREDO, G.J., SILVA, D.N. Calibração de potássio nas folhas de soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, n.12, p.227-230, 1993.

BORKERT, C.M.; FARIAS, J.R.B.; SFREDO, G.J.; TUTIDA, F.; SPOLADORI, C.L. Resposta da soja à adubação e disponibilidade de potássio em latossolo roxo distrófico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.1235-1249, 1997a.

BORKERT, C.M.; FARIAS, J.R.B.; SFREDO, G.J.; TUTIDA, F.; SPOLADORI, C.L. Resposta da soja à adubação e disponibilidade de potássio em latossolo roxo álico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.1119-1129, 1997b.

BORTOLUZZI, E.C.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C.; TESSIER, D. Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.327-335, 2005.

BRAGA, J.M. **Formas de potássio e estabelecimento de nível crítico para alguns solos do Estado de Minas Gerais**. Piracicaba, 1972. 143p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

BRITZKE, D.; SILVA, L.S.; KAEFER, S.; POCOJESKI, E.; MOTERLE, D. PIT, L.L.; ROSSI, J.B. Formas de potássio em solos de várzea do Rio Grande do Sul e absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: SBCS/UFRS, 2007. 5p. (CD ROM).

BRUNETTO, G.; GATIBONI, L.C.; RHEINHEIMER, D.S.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.565-571, 2005.

BÜLL, L.T. **Formas de potássio e suas relações com parâmetros vegetais em alguns solos da região de Botucatu**. Piracicaba, 1983. 150p. (Tese de Doutorado) – Escola Superior de Agrícola “Luiz de Queiroz” – ESALQ/Universidade de São Paulo – USP.

CABBAU, A.R.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L.A.; ANDRADE, A.T.; LIMA SOBRINHO, R.R. Resposta e níveis críticos de potássio para o arroz cultivado em solos de várzea inundados. **Ciência & Agrotecnologia**, v.28, n.1, p.75-86, 2004.

CASTILHOS, D.D.; MEURER, E.J.; KAMPF, N.; PINTO, L.F.S. Mineralogia e fontes de potássio em solos do Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.579-587, 2002.

CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.31, p.979-983, 2001.

CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.977-982, 2002.

CHAVES, L.H.G.; DIAS, M.M. Formas de potássio em Regossolos do Estado da Paraíba. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.7, p.523-528, 1996.

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

CHIBA, M.K.; NATALE, W.; CRUZ, M.C.P.; TEIXEIRA, L.A.J.; CENTURION, J.F. Potássio nas frações texturais de Latossolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.30, n.4, p.581-587, 2008.

COX, A.E.; JOERN, B.C.; BROUDER, S.M.; GAO, D. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. **Soil Science Society of American Journal**. v.63, p.902-911, 1999.

CRISÓSTOMO, L.A.; CASTRO, A.F. Poder de suprimento de potássio de solos da zona fisiográfica de Baturité, Ceará, Brasil. **Turrialba**, v.20, p.425-433, 1970.

CURI, N. **Potássio no solo**. In: SIMPOSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, POTAFOS. 2004. (Informações Agronômicas, n.107).

CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J.J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.S. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira de Pesquisa de Potassa e do Fosfato, 2005. p.71-92.

DEFELIPO, E.V. **Teores de potássio em solos de Piracicaba e estabelecimento de seu nível crítico**. Piracicaba, 1974, 124p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior Agrícola Luiz de Queiroz.

DIAS, G.F.; MOTERLE, D.F.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. BORKERT, C.M.; TOEBE, M. Formas de potássio em um Latossolo com histórico de adubação submetida a cultivos sucessivos. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: SBCS/UFRS, 2007. 3p. (CD ROM).

DINIZ, S.F.; BASTOS, F.O.M.; LIMA, R.H.C.; JIMENEZ-RUEDA, J.R. Fontes de potássio não trocável e potássio total em quatro solos do Estado do Ceará. **Geociências**, v.26, n.4, p.379-386, 2007.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2.ed. Brasília: EMBRAPA/DPI, 2006. 306p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos e análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária/Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

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. p.551-594, 2007.

ERNANI, P.R.; DIAS, J.; FLORES, J.A. Annual additions of potassium to the soil increased apple yield in Brazil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, p.1291-1304. 2002.

FASSBENDER, H. W. **Química de solos, com ênfase em solos de America Latina**. Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1984. 398p.

FERNANDES, D. M.; ROSSETTO, C. A. V.; ISHIMURA, I.; ROSOLEM, C. A. Nutrição da soja e formas de potássio no solo em função de cultivares e adubação potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, n.3, p. 405-410, 1993.

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

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

GOEDERT, W.J.; SYER, J.K.; COREY, R.B. Relações quantidade/intensidade de potássio em solo do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.10, p.31-35, 1975.

GOMMERS, A.; THIRY, Y.; DELVAUX, B. Rhizospheric mobilization and plant uptake of radiocesium from weathered soils: I. Influence of potassium depletion. **Journal of Environmental Quality**, v.34, p.2167-2173, 2005.

HAVLIN, J.L.; WESTFALL, D.G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. **Soil Science Society of Americana Journal**, v.49, p.366-370, 1985.

HINSINGER, P.; JAILLARD, B. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **Journal of Soil Science**, v.44, p.525-534, 1993.

IAPAR. INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 40p. (Circular Técnica, 76).

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D.F.; RHEINHEIMER, D.S. depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p1003-1010, 2007.

KAMINSKI, J.; REINHEIMER, D.S.; BARTZ, H.R.; XAVIER, F.M.; VEDUIN, J.V.R. Dinâmica da disponibilidade de potássio em solo arenoso. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, SOLO-SUELO, 8., Águas de Lindóia, 1996. **Anais...** Campinas, SBCS, 1996. (CD-ROM).

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; BARTZ, H.R.; XAVIER, F.M.; VEDUIN, J.V.R. Dinâmica da disponibilidade de potássio em solo arenoso. In: XIII CONGRESSO LATINO-AMERICANO. **Anais...** Santa Maria: PPGCS/UFSM. 2005. 3p. (CD ROM).

KNUDSEN, D.; PETERSON, G.A.; PRATT, P.F. Lithium, sodium, and potassium. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods os soil analysis**. Chemical and microbiological properties. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.225-246. Parte 2.

LANA, M.C.; NEVES, J.C.L. Capacidade de suprimento de potássio em solos sob reflorestamento com eucalipto do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, v.18, p.115-122, 1994.

LEPSCH, I.F.; ROTTA, C.L.; VALADARES, J.M.A.S. Mineralogia, classificação e formas de potássio em solos da estação experimental de Pindorama, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.63-68. 1978.

LIU, Y.J.; LAIRD, D.A.; BARAK, P. Release and fixation of ammonium and potassium under long term fertility management. **Soil Science of Society Americana Journal**. v.61, p.310-314, 1997.

LUCHESE, E.B. ; LENZI, E.; FAVERO, L.O.B. . **Química dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001. 159p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 210 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1998. 889p.

MELLO, V.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.159-164, 1995.

MELO, G.W. **Mineralogia, cinética e disponibilidade de potássio em solos intemperizados do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1998. 138p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MELO, G.W.; MEURER, E.J.; PINTO, L.F.S. Fontes de potássio em solos distroférricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.597-603, 2004b.

MELO, V.F.; CORREA, G.F.; MASCHIO, P.A.; RIBEIRO, A.N.; LIMA, V.C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solo do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.807-819, 2003.

MELO, V.F.; CORRÊA, G.F.; RIBEIRO, A.N.; MASCHIO, P.A. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração areia de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.533-545, 2005.

MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FONTES, M.P.F.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras no município de aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.29-41, 2002.

MELO, V.F.; RIBEIRO, A.N.; MASCHIO, P.A.; CORRÊA, G.F.; LIMA, V.C. Mineralogia e formas de potássio e magnésio em diferentes classes de pesos e tamanhos da fração areia de solos do triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.219-231, 2004a.

MENGEL, K.; RAHMATULLAH. Exploitation of potassium by various crop species from primary minerals in soils rich in micas. **Biology and Fertility of Soils**, v.17, p.75-79, 1994.

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

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.375-382, 1993.

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

MEURER, E.J.; INDA JÚNIOR, A.V. Potássio e adubos potássicos. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, p.139-151, 2004.

MEURER, E.J.; KAMPF, N.; ANGHINONI, I. Fontes potenciais de potássio em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.41-47, 1996.

MIELNICZUK, J. Avaliação da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração: experiências brasileiras In: YAMADA, T. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS/IAPAR, p.189-203, 1982.

MIELNICZUK, J. Formas de potássio em solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, n.2-3, p.55-61, 1977.

MIELNICZUK, J. **O potássio no solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1978. 79p. (Boletim Técnico, 2).

MIELNICZUK, J.; SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.115-120, 1978.

MINEROPAR. Minerais do Paraná. **Mapa Geológico do Estado do Paraná**. Disponível em <http://www.mineropar.pr.gov.br/mineropar/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=22>. Acesso em dezembro de 2009.

MORAIS, E.R.C.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L.; MAIA, C.E. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais, e sua contribuição para o potássio não trocável. In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Gramado, 2007. **Anais...** Gramado: SBCS/UFRS, 2007. 5p. (CD ROM).

MOTERLE, D.F.; CASALI, C.A.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. Contribuição das formas de potássio no suprimento de uma sucessão de cultivos. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Recife, 2005. **Anais...** Recife: SBCS, 2005. 3p. (CD ROM).

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, I.C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da Região Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.37-42, 1991a.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, I.C. Dinâmica de liberação de potássio dos solos da região Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.43-47, 1991b.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Formas de potássio em solos da região sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.7-12, 1989.

NOVAIS, R.F. Sugestões de adubação para a cultura da soja. In: 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, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 359p.

OLIVEIRA, V. **Formas de potássio em 21 solos do Rio Grande do Sul e sua capacidade de suprir potássio às plantas**. Porto Alegre, 1970, 123p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PATELLA, J.F. Influência de quinze anos de adubação NPK sobre o rendimento de trigo em algumas propriedades químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.31-35, 1980.

PEREIRA-FILHO, I.A.; RODRIGUES, J.A.S.; KARAM, D.; COELHO, A.M.; ALVARENGA, R.C.; CRUZ, J.C.; CABEZAS, W.L. Manejo da cultura do milheto. In: NETTO, D.A.M.; DURÕES, F.O.M., (Eds.). **Milheto: tecnologias de produção e agronegócio**. Brasília, Embrapa Informações Tecnológicas, 2005. p.59-87.

PERNES-DEBUYSER, A.; PERNES, M.; VELDE, B.; TESSIER, D. Soil mineralogy evolution in the INRA 42 plots experiment (Versailles, France). **Clay Clay Mineralogy**, v.51, p.577-584, 2003.

PRATT, P.F. Potassium. In: Black, C.A. (Ed.). **Methods of Soils Analysis**. Vol.2, Madison: ASA, p.1022-1030, 1965.

PREZOTTI, L.C.; DEFELIPO, B.V. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.109-114, 1987.

- RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba : Potafos, 1981. 142p.
- RAIJ, B. Van. **Potássio: necessidade e uso na agricultura moderna**. Piracicaba: POTAFÓS, 45p. 1990.
- RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2^a ed. Campinas: IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- RAMOS, A.; DURANGO, J. GARNIER, G.; DÍAZ, B.; BARRERA, J.L. Evaluación de las formas de potásio en suelos de la zona platanera de Córdoba (Colombia). **Agronomía Colombiana**, v.24, n.2, p.334-339, 2006.
- RASNAKE, M.; THOMAS, G.W. Potassium of some alluvial soils in Kentucky. **Soil Science of Society Americana Journal**, v.40, p.883-888, 1976.
- RESENDE, R.F.; CURTI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.ed. Viçosa : Núcleo de Estudos e Planejamento de Uso da Terra, 1997. 367p.
- RHAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Stanford, v. 50, p. 665-693, 1999.
- RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; ROBAINA, A.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; HORN, D. **Situação da fertilidade dos solos no Estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Depto. de Solos, 2001. 41p. (Boletim Técnico, n. 2).
- RICCI, M.S.F.; DEFELIPO, B.V.; COSTA, L.M.; REZENDE, S.B. As frações granulométricas do solo como reserva de potássio para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.181-186, 1989.
- RICHARDS, J. E.; BATES, T. E.; SHEPPARD, S. C. Studies on the potassium-supplying capacities of Southern Ontário soils. I: field and greenhouse experiments. **Canadian Journal of Soil Science**, v.68, p.183-197, 1988.
- ROSOLEM, C.A.; BESSA, A.M.; PEREIRA, H.F.M. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, p.1045-1054, 1993.
- ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de coberturas de solo em função da quantidade de chuva recebida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.355-362, 2003.
- ROSOLEM, C.A.; MACHADO, J.R.; RIBEIRO, D.B.O. Formas de potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.121-125, 1988.

ROSOLEM, C.A.; MARUBAYASHI, O.M.; THIAGO, W.M. Significância de formas não-trocáveis de potássio na nutrição da soja. **Científica**, v.24, p.263-273, 1996.

ROSOLEM, C.A.; NAKAGAWA, J.; MACHADO, J.R. Adubação potássica da soja em latossolo vermelho escuro fase arenosa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, p.1319-1326, 1984.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1033-1040, 2006.

SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Distribuição de potássio no perfil de um solo influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.45-50, 1985.

SCHERER, E.E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo húmico de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.57-62, 1998.

SILVA, D.N.; MEURER, E.; KAMPF, N.; BORKET, C.M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.433-439, 1995.

SILVA, I.R. Eficiência nutricional para potássio em espécies florestais nativas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.257-264, 1996.

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

SILVA, J.R.T.; MEURER, E.J. Disponibilidade de potássio para as plantas em solos do Rio Grande do Sul em função da capacidade de troca de cátions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p.137-142, 1988.

SIMARD, R.R.; De KIMPE, C.R.; ZIZKA, J. The kinetics of nonexchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.69, p.663-675, 1989.

SIMONETE, M. A. **Efeito residual da adubação potássica do azevém sobre o arroz subsequente em plantio direto**. Pelotas, 1998. 40f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1998.

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

SPARKS, D.L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton, CRC Press, 2000, Section D. p.48.

SPARKS, D.L. Chemistry of soil potassium in Atlantic coastal plain soils: a review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.11, p.435-449, 1980.

SPARKS, D.L. Potassium release in sandy soils. In: SPARKS, D.L., (Ed.). **Nutrient balances and the need for potassium**. JPI Congress, 13. Reims, 1986. p.93-105. (JPI Congress, 13).

TAIWO, A.A.; ADETUNJI, M.T.; AZEEZ, J.O.; BAMGBOSE, T. Potassium supplying capacity of some tropical alfisols in southwest Nigeria as measured by intensity, quantity and capacity factors. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. v.84, n.2, p.105-118, 2009.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS – Departamento de Solos. 1995, 174p. (Boletim técnico, 5).

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 5.ed. New York, Macmillan, 1993. 634p.

UFV. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Manual de utilização do programa SAEG (Sistemas para Análises Estatísticas e Genéticas)**. Viçosa: UFRV, 1999. 59p.

VEDUIN, J.V.R. **Estimativa da disponibilidade de potássio em solo arenoso**. Santa Maria, 1994. 43p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

VELDE, B.; PECK, T. Clay minerals changes in the Morrow experimental plots, University of Illinois. **Clay Clay Mineralogy**, v.50, p.364-370, 2002.

VILELA, L.; SOUSA, D.M.G.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2004, p.169-183.

VILLA, M. R. **Potássio em solos de várzea e nutrição potássica do feijoeiro**. 1999. 57p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

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

WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2297-2305, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE 1. Necessidade de corretivo e quantidade de corretivo aplicada nos diferentes solos amostrados no Estado do Paraná

Solo	Textura do solo	Necessidade de corretivo ⁽¹⁾	Quantidade de corretivo aplicado ⁽¹⁾
		t/ha	g/vaso
LVef	Muito argilosa	6,15	24,58
LVd	Muito argilosa	7,51	30,03
LVAe	Média	_(²)	_(²)
LVAd	Média	4,42	17,68
NVef	Argilosa	3,83	15,31
NVe	Muito argilosa	9,58	38,30
PVAd	Arenosa	0,56	2,24
PVAe	Muito argilosa	4,07	16,27
RRe	Muito argilosa	2,47	9,88
FX	Muito argilosa	9,65	38,60
GX	Argilosa	7,47	29,87
CX	Média	2,09	8,38

⁽¹⁾ Necessidade e quantidade de corretivo aplicado nos diferentes solos para elevar a saturação por bases a 70% nos solos argilosos, 50% nos arenosos e 60% nos solos de textura média, para corretivo de PRNT = 85%. ⁽²⁾ Solo sem necessidade de aplicação de corretivo, em virtude da saturação de bases de 64,48%. (LVef = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVef = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háptico; GX = Gleissolo Háptico; CX = Cambissolo Háptico).

APÊNDICE 2. Doses de potássio aplicada antes dos seis cultivos e total para elevar o nível de saturação de K na CTC_{pH 7,0} a 6% para os diferentes solos amostrados no Estado do Paraná

Solo	Cultivo ⁽¹⁾						Dose total
	1	2	3	4	5	6	
----- (mg dm ⁻³ de K) -----							
LVEf	201	120	91	68	77	63	620 ⁽²⁾
LVd	259	139	82	79	89	54	702
LVAe	239	129	68	44	77	35	592
LVAd	244	106	76	54	66	49	595
NVEf	250	127	81	63	72	64	657
NVe	294	157	92	61	100	50	754
PVAd	92	77	49	31	49	45	343
PVAe	256	137	86	67	93	61	700
RRe	214	105	80	59	67	55	581
FX	257	149	75	55	85	51	673
GX	363	141	85	59	96	44	788
CX	131	98	67	47	62	40	445
----- Dose equivalente a K ₂ O (kg ha ⁻¹) -----							
LVEf	484	289	219	164	186	152	1494
LVd	624	335	198	190	215	130	1692
LVAe	576	311	164	106	186	84	1427
LVAd	588	255	183	130	159	118	1434
NVEf	603	306	195	152	174	154	1584
NVe	709	378	222	147	241	121	1817
PVAd	222	186	118	75	118	108	827
PVAe	617	330	207	161	224	147	1687
RRe	516	253	193	142	161	133	1400
FX	619	359	181	133	205	123	1622
GX	875	340	205	142	231	106	1899
CX	316	236	161	113	149	96	1073

⁽¹⁾ 1: soja, 2: milho, 3: trigo, 4: feijão, 5: soja e 6: milho. ⁽²⁾ Dose de potássio utilizada no cálculo da contribuição das formas não trocáveis. (LVEf = Latossolo Vermelho eutrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; LVAe = Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico; LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NVEf = Nitossolo Vermelho eutrófico; NVe = Nitossolo Vermelho eutrófico; PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe = Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RRe = Neossolo Regolítico eutrófico; FX = Plintossolo Háplico; GX = Gleissolo Háplico; CX = Cambissolo Háplico).

APÊNDICE 3. Potássio adicionado (Ki), concentração de equilíbrio (Kf), quantidade adsorvida ou desorvida (ΔK), raiz quadrada da atividade de Ca + Mg ($aCa + aMg$)^{0,5} e quociente de atividade de potássio (QAK) para elaboração do relação QAK versus ΔK (média de três repetições)

Solo	Ki	Kf	"f"	ΔK (eixo y)	$(aCa + aMg)^{0,5}$	QKA (eixo x)
	----- mmol L ⁻¹ -----			mmol _c kg ⁻¹	----- (mmol L ⁻¹) ^{0,5} -----	
LVef	1,000	0,856	10	1,440	1,07	0,800
	0,750	0,691	10	0,590	1,06	0,652
	0,500	0,532	10	-0,320	1,05	0,507
	0,250	0,387	10	-1,370	1,04	0,372
	0,125	0,321	10	-1,960	1,03	0,312
	0,000	0,295	10	-2,950	1,02	0,289
LVd	1,000	0,996	10	0,040	1,08	0,922
	0,750	0,833	10	-0,830	1,04	0,801
	0,500	0,612	10	-1,120	1,04	0,588
	0,250	0,426	10	-1,760	1,03	0,414
	0,125	0,328	10	-2,030	1,02	0,322
	0,000	0,267	10	-2,670	1,01	0,264
LVAe	1,000	0,847	10	1,530	1,06	0,799
	0,750	0,643	10	1,070	1,05	0,612
	0,500	0,459	10	0,410	1,03	0,446
	0,250	0,321	10	-0,710	1,05	0,306
	0,125	0,216	10	-0,910	1,02	0,212
	0,000	0,101	10	-1,010	1,01	0,100
LVAd	1,000	0,987	10	0,130	1,07	0,922
	0,750	0,853	10	-1,030	1,06	0,805
	0,500	0,669	10	-1,690	1,04	0,643
	0,250	0,477	10	-2,270	1,05	0,454
	0,125	0,384	10	-2,590	1,03	0,373
	0,000	0,315	10	-3,150	1,04	0,303
NVef	1,000	0,751	10	2,490	1,07	0,702
	0,750	0,594	10	1,560	1,05	0,566
	0,500	0,421	10	0,790	1,03	0,409
	0,250	0,327	10	-0,770	1,04	0,314
	0,125	0,267	10	-1,420	1,02	0,262
	0,000	0,208	10	-2,080	1,01	0,206
NVe	1,000	0,864	10	1,360	1,05	0,823
	0,750	0,716	10	0,340	1,04	0,688
	0,500	0,508	10	-0,080	1,04	0,488
	0,250	0,359	10	-1,090	1,03	0,349
	0,125	0,297	10	-1,720	1,02	0,291
	0,000	0,238	10	-2,380	1,01	0,236
PVAd	1,000	0,997	10	0,030	1,08	0,923
	0,750	0,787	10	-0,370	1,07	0,736
	0,500	0,547	10	-0,470	1,06	0,516
	0,250	0,314	10	-0,640	1,05	0,299
	0,125	0,214	10	-0,890	1,04	0,206
	0,000	0,118	10	-1,180	1,03	0,115

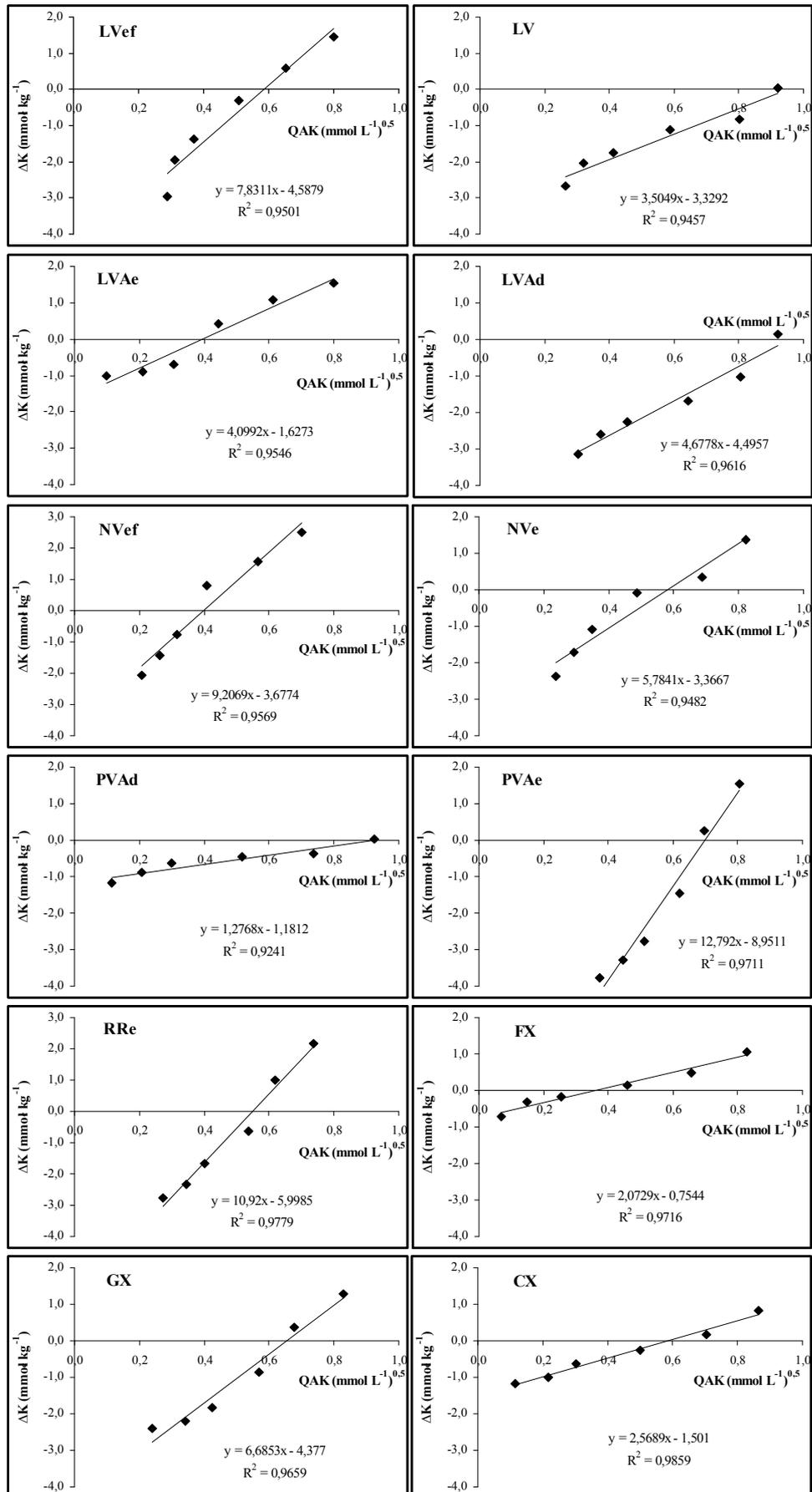
Continua...

APÊNDICE 3. Continuação...

Solo	Ki	Kf	“f”	ΔK (eixo y)	$(Ca + Mg)^{0,5}$	QKA (eixo x)
	----- mmol L ⁻¹ -----			mmol _c kg ⁻¹	----- (mmol L ⁻¹) ^{0,5} -----	
PVAe	1,000	0,847	10	1,530	1,05	0,807
	0,750	0,724	10	0,260	1,04	0,696
	0,500	0,646	10	-1,460	1,04	0,621
	0,250	0,528	10	-2,780	1,03	0,513
	0,125	0,454	10	-3,290	1,02	0,445
	0,000	0,377	10	-3,770	1,01	0,373
RRe	1,000	0,782	10	2,180	1,06	0,738
	0,750	0,649	10	1,010	1,05	0,618
	0,500	0,564	10	-0,640	1,05	0,537
	0,250	0,416	10	-1,660	1,04	0,400
	0,125	0,357	10	-2,320	1,03	0,347
	0,000	0,277	10	-2,770	1,02	0,272
FX	1,000	0,895	10	1,050	1,08	0,829
	0,750	0,701	10	0,490	1,07	0,655
	0,500	0,486	10	0,140	1,06	0,458
	0,250	0,266	10	-0,160	1,05	0,253
	0,125	0,157	10	-0,320	1,05	0,150
	0,000	0,072	10	-0,720	1,03	0,070
GX	1,000	0,871	10	1,290	1,05	0,830
	0,750	0,713	10	0,370	1,05	0,679
	0,500	0,586	10	-0,860	1,03	0,569
	0,250	0,434	10	-1,840	1,02	0,425
	0,125	0,345	10	-2,200	1,01	0,342
	0,000	0,241	10	-2,410	1,01	0,239
CX	1,000	0,917	10	0,830	1,06	0,865
	0,750	0,732	10	0,180	1,04	0,704
	0,500	0,526	10	-0,260	1,05	0,501
	0,250	0,314	10	-0,640	1,04	0,302
	0,125	0,224	10	-0,990	1,03	0,217
	0,000	0,118	10	-1,180	1,03	0,115

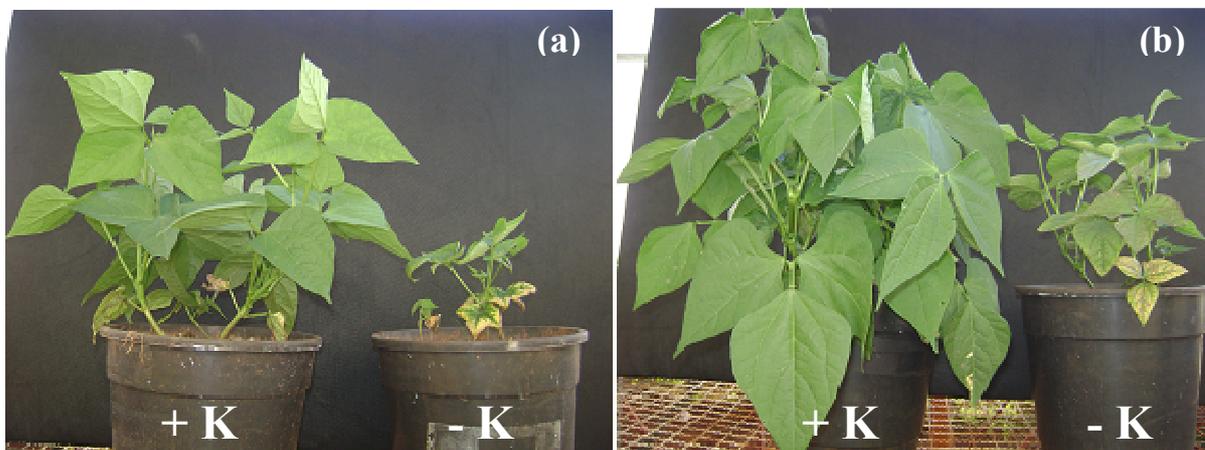
Continua...

Continuação..... (Gráficos da relação QAK versus ΔK para os doze solos).

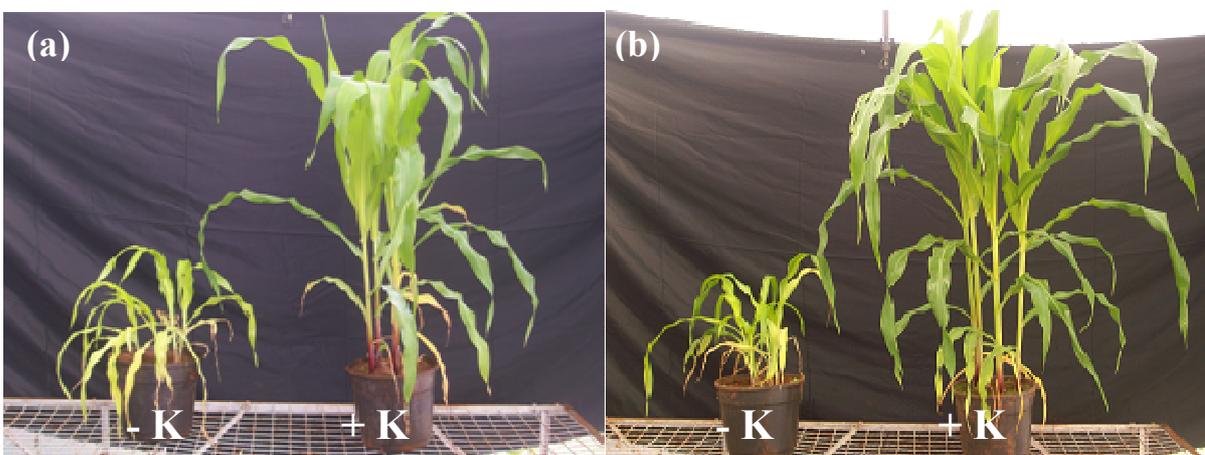




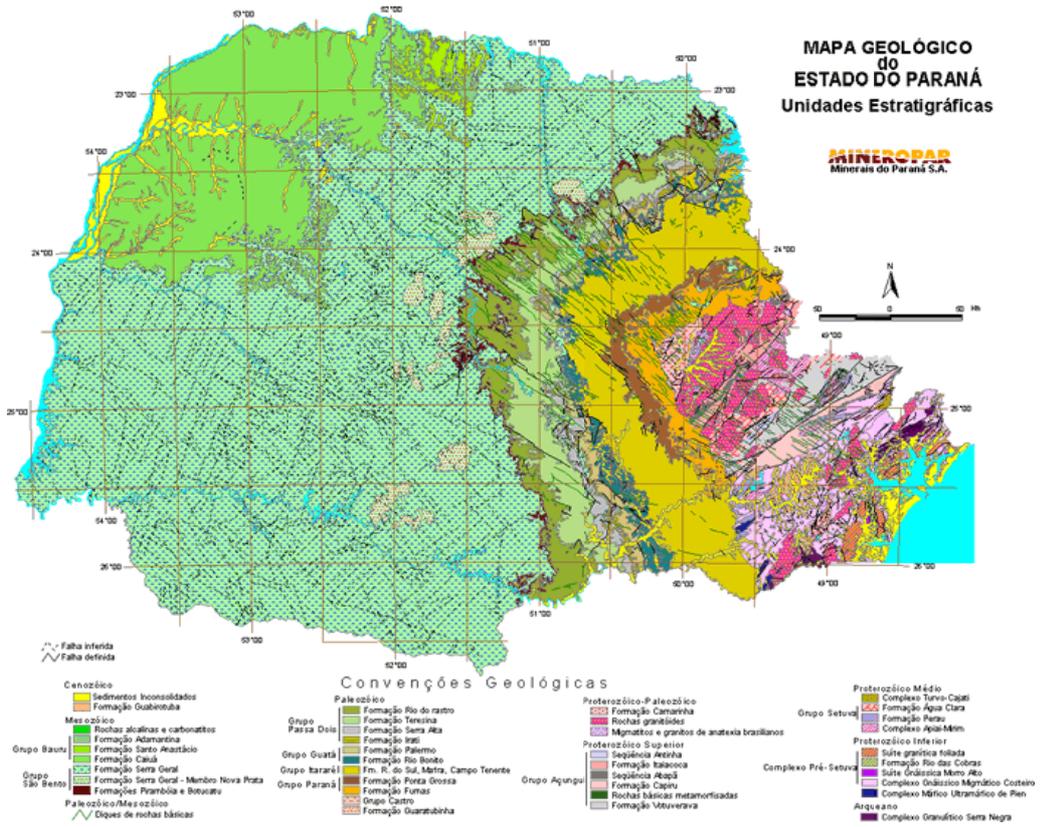
APÊNDICE 4. Sintomas típicos de deficiência de potássio em folhas de feijão (cultivo 4) cultivado em Latossolo Vermelho eutrófico – (a), deficiência de potássio em soja (cultivo 5) cultivado em Latossolo Vermelho eutrófico – (b) e, deficiência de potássio em milho (cultivo 6) cultivado em Argissolo Vermelho distrófico – (c).



APÊNDICE 5. Desenvolvimento da cultura do feijão com (+K) e sem (-K) adição de fertilizante potássico em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico – (a) e, em Latossolo Vermelho eutrófico – (b).



APÊNDICE 6. Desenvolvimento da cultura do milho com (+K) e sem (-K) adição de fertilizante potássico em Latossolo Vermelho eutrófico – (a) e, em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico – (b).



APÊNDICE 7. Mapa geológico do Estado do Paraná. Unidades estratigráficas. Fonte: MINEROPAR (2009).