CALAGEM E ADUBAÇÃO POTÁSSICA EM SOJA CULTIVADA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO

FÁBIO ALVARES DE OLIVEIRA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **QUIRINO AUGUSTO DE CAMARGO CARMELLO**

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura “Luiz de Queiroz”,
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Abril – 2000

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Oliveira, Fábio Alvares de

Calagem e adubação potássica em soja cultivada em casa-de-vegetação / Fábio Alvares de Oliveira. - Piracicaba, 2000.

69 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.
Bibliografia.

1. Adubação potássica 2. Calagem 3. Cultivo em estufa 4. Fertilidade do solo 5. Soja
I. Título

CDD 633.34

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais, Hélio e Mafalda;
meus irmãos, Marcelo e Rodrigo;
e à Lucienne

DEDICO

A toda minha
família, pela
confiança

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) por minha formação;

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos;

À Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento concedido para a execução do projeto;

Ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, pela infra-estrutura e pelo apoio para a realização deste trabalho;

Ao Centro de Manutenção de Equipamentos (CEMEQ/UNESP), pelo desenvolvimento dos tubos para extração da solução do solo;

À Stoler do Brasil, Divisão Arbore, pelo fornecimento do fertilizante fluido CoMo98;

Aos professores do CPG - Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, por todo ensinamento, e em especial aos Drs. Antonio Roque Dechen e Francisco Antonio Monteiro pela amizade;

Aos Drs. Hipólito A. A. Mascarenhas, Roberto Tetsuo Tanaka e Edmilson J. Ambrosano do Instituto Agrônômico (IAC) pelas sugestões na elaboração do trabalho;

Ao Dr. Ronaldo S. Berton do IAC pelas sugestões para o processo de extração da solução do solo;

Aos funcionários do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, Alexandre de Oliveira, Edinéia Cristina S. Mondoni, Lúcia Helena S. Pavan Forti, Lurdes A. Dário de González, Mirtes Ventura Sesso, Nivanda Maria de Moura e Sueli Maria Amaral de Campos Bovi, pelo auxílio nas análises químicas e pela amizade;

À Profa. Dra. Siu Mui Tsai do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) pelo fornecimento do inoculante;

Ao Prof. Doutor Raymond S. Pacovsky pelo auxílio na elaboração do summary;

À bibliotecária Eliana M. Garcia Sabino pelo auxílio na organização das referências bibliográficas;

Aos estagiários do departamento de Solos e Nutrição de Plantas, que colaboraram na realização deste trabalho;

Aos amigos do CPG – Solos e Nutrição de Plantas e aos moradores das Repúblicas Vira Kuka, Arado e Lesma Lerda pela amizade;

Ao Fernando Toledo Santos de Miranda e Jaqueline Fogaça Miranda, pelo companheirismo;

Em especial ao Prof. Dr. Quirino Augusto de Camargo Carmello pela amizade e orientação que possibilitaram a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Local de instalação do experimento e solo utilizado.....	12
3.2 Caracterização física, mineralógica e química do solo.....	12
3.3 Tratamentos.....	13
3.4 Delineamento experimental.....	14
3.5 Instalação e acompanhamento do experimento.....	15
3.6 Análises químicas do material vegetal.....	17
3.7 Análises químicas de terra.....	17
3.8 Análise estatística.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Análise de terra.....	21
4.2 Análise do material vegetal.....	31
5 CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

CALAGEM E ADUBAÇÃO POTÁSSICA EM SOJA CULTIVADA EM CASA-DE-VEGETAÇÃO

Autor: FÁBIO ALVARES DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. QUIRINO AUGUSTO DE CAMARGO CARMELLO

RESUMO

Apesar da redução dos teores trocáveis de K nos solos cultivados, a cultura da soja não tem apresentado respostas à sua aplicação em quantidades elevadas, uma vez que a disponibilidade de K está relacionada com a concentração de outros cátions, como o Ca e o Mg. Assim, a resposta ao K pode estar relacionada com a calagem, principal fonte de Ca e Mg para o solo. Com o objetivo de se estudar a nutrição potássica da soja em relação à variação dos teores de cálcio e magnésio do solo, foi executado um experimento em casa-de-vegetação utilizando-se um LVa (Typic Hapludox), textura média e mineralogia oxidica. Foi adotado o delineamento experimental em blocos casualizados e os tratamentos foram arranjos no esquema fatorial 5 x 7, com 4 repetições. Os teores de Ca e Mg do solo variaram com a utilização de cinco níveis de calcário dolomítico calcinado (0, 500, 1000, 1500, 2000 mg dm⁻³), aplicados 40 dias antes da semeadura. Foram utilizados sete níveis de potássio (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 mg dm⁻³ de K), aplicados na forma de KCl, previamente à semeadura. Utilizou-se plantas do cultivar de soja precoce IAC-17, que apresentaram 112 dias de ciclo. Em cada vaso, foram cultivadas 4 plantas, avaliando-se duas no estágio R 2 (florescimento pleno) e duas no estágio R 8 (maturação

plena). Foram avaliados: a produção de material vegetal seco, o teor foliar e a acumulação do K, do Ca e do Mg pela parte aérea da soja, além dos teores trocáveis e das atividades na solução do solo desses nutrientes, no período anterior e posterior ao cultivo das plantas.

Ao final do cultivo, os teores de K trocável (resina) e da atividade de K em solução foram reduzidos, mesmo quando foram aplicados 90 mg dm^{-3} de K. O aumento dos teores trocáveis de Ca e de Mg no solo, em função da calagem, intensificou a inibição competitiva sobre a absorção de K pelas plantas de soja. A influência competitiva do K sobre a absorção de Mg foi mais intensa do que sobre a de Ca. Os índices de disponibilidade de K no solo, relativos aos teores de Ca e de Mg, tanto no complexo de troca quanto na solução do solo, apresentaram-se diretamente correlacionados com a nutrição potássica da soja. Sintomas de deficiência de K, aliados às menores produções de material vegetal, teor foliar e extração de K, foram relacionados aos valores da relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ trocável no solo superiores a 36 ou da relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ nas folhas superiores a 3,6. Por outro lado, as maiores produções de material vegetal seco, aliadas ao maior equilíbrio dos teores foliares de K, Ca e Mg, foram obtidas quando a relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ trocável no solo apresentava-se dentro da faixa de 18 a 30. Não foram verificados aumentos de produção a partir de 30 a 45 mg dm^{-3} de K aplicados na semeadura. A relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ trocável no solo mostrou-se um índice importante de avaliação da disponibilidade do K no solo, que poderia ser incorporado às análises de terra para fins de recomendação de adubação potássica para a cultura da soja. A recomendação de adubação potássica para a cultura da soja também deve considerar a quantidade de calcário aplicada.

LIMING AND POTASSIUM FERTILIZATION IN GREENHOUSE CULTIVATED SOYBEAN

Author: FÁBIO ALVARES DE OLIVEIRA

Adviser: Prof. Dr. QUIRINO AUGUSTO DE CAMARGO CARMELLO

SUMMARY

In spite of the reduction of available K in cultivated soils, soybean does not respond well to high levels of K, because its availability is related to the concentrations of other cations, like Ca and Mg. Therefore, the response to K application has been related to liming, which provides the major source of Ca and Mg to soil. In order to study K nutrition related to changes in soil levels of Ca and Mg, a greenhouse experiment was executed using an alic Yellow Red Latosol (Typic Hapludox) sandy loam with oxydic mineralogy. A 5 x 7 factorial randomized block experimental design was adopted, with four replications. Ca and Mg soil levels varied, using five levels of roasted dolomite limestone (0, 500, 1000, 1500, 2000 mg dm⁻³), applied 40 days before sowing. Seven K levels (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 mg dm⁻³ of K) were applied in the form of KCl, previous to sowing. The early blooming soybean cultivar, IAC-17, which presented 112 day cycle, was used. Four plants were cultivated in each pot. Two plants were evaluated at the R 2 stage (full bloom) and the other two at the R 8 stage (full maturity). Dry matter production, leaf K, Ca and Mg concentrations, and their accumulations, by soybean shoots were evaluated. Exchangeable

K, Ca and Mg levels in the soil and their soil solution activities were measured before and after the growth of plants.

Levels of exchangeable K (resin method) and the K soil solution activity were reduced after the growing season, even with applications of 90 mg dm^{-3} of K. Exchangeable Ca and Mg levels increased with liming, as did the competitive inhibition over K absorption by soybean. The competitive influence of K over the Mg absorption was more intense than that over Ca. On the evaluation either of the exchange complex or the soil solution, the index of soil K availability, related to Ca and Mg levels, correlated directly to K nutrition in soybean. K deficiency symptoms were linked to the lower dry matter yield, lower leaf K concentration and lower K accumulation by soybean shoots. These K deficiency symptoms were linked to a soil ratio of exchangeable $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ greater than 36 or leaf $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ concentration greater than 3.6. Otherwise, greater dry matter yield, linked to the optimum equilibrium of leaf K, Ca and Mg concentrations, were verified when the soil ratio of exchangeable $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ was between 18 to 30. Dry matter yield was not increased when K rates were greater than 30 to 45 mg dm^{-3} at sowing. The soil ratio of exchangeable $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ presented an important index to evaluate soil K availability, which could be incorporated into soil analysis in order to make recommendations regarding K fertilization for soybean. Recommendations regarding K fertilization for soybean must consider the liming rates applied too.

1 INTRODUÇÃO

Depois do nitrogênio, o potássio (K) é o nutriente mais extraído pela soja e o que se apresenta em maiores concentrações nos tecidos.

Mesmo assim, são poucos os trabalhos em que se observam respostas dessa cultura à adubação potássica, evidenciando-se, entre os fatores causais, o tipo de solo, o nível adequado do nutriente no solo, a exigência nutricional do cultivar, o tempo de duração reduzido dos experimentos, além da aplicação inadequada do fertilizante.

Em virtude da falta de resposta, as práticas adotadas pelos produtores provocaram, no decorrer do tempo, a redução dos teores de K disponíveis nos solos cultivados com soja. As principais causas dessa redução foram a diminuição da quantidade de potássio utilizada nos programas de fertilização da cultura e o aumento da extração de K do solo, gerado pelo melhoramento genético dos cultivares para aumento de produtividade e pelo uso intensivo da terra pelos programas de cultivos sucessivos.

Ao longo dos anos, a redução da disponibilidade de K nos solos tornou esse nutriente limitante para a cultura da soja, resultando na diminuição da produtividade, obtida em experimentos de longa duração, e dos teores de K nas folhas, associados às primeiras observações dos sintomas de deficiência de potássio em soja, no campo.

Ainda assim, dependendo do tipo de solo e dos seus respectivos teores de K, a cultura da soja não tem apresentado respostas às aplicações elevadas desse nutriente. Constatou-se, então, que outros fatores que não somente a concentração de K, mas a disponibilidade de outros cátions presentes em quantidades maiores no solo, como o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg), determinam a sua disponibilidade no solo e a sua absorção pelas plantas.

A calagem, principal fonte de Ca e Mg, é também responsável por alterações nas propriedades químicas dos solos, tais como o aumento do pH e da CTC efetiva. A calagem pode influenciar, portanto, a resposta das plantas à adubação potássica, porque determina a saturação por bases do solo e a relação entre esses cátions trocáveis divalentes e o potássio, que estão diretamente relacionadas com a quantidade de K adsorvida ao complexo de troca.

A recomendação da adubação potássica da cultura da soja deve considerar, portanto, não só o teor de K trocável mas, principalmente, o equilíbrio das quantidades disponíveis dos cátions nos solos. A relação $(Ca+Mg)/K$ trocável nos solos, assim como a razão entre as atividades de $K^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})^{1/2}$ na solução do solo e o potencial de potássio-cálcio-magnésio ($pK - \frac{1}{2}p(Ca+Mg)$) devem, portanto, se mostrar mais adequados que o teor de K trocável para os estudos sobre a nutrição potássica.

O trabalho teve por objetivo avaliar a resposta das plantas de soja à aplicação de potássio em função do nível de calcário aplicado e identificar os índices de avaliação do K do solo mais relacionados à sua verdadeira disponibilidade para as plantas. Para isso, foi conduzido um experimento com soja cultivada num Latossolo Vermelho Amarelo (LV), em vasos, em condições controladas de casa-de-vegetação, variando-se 7 níveis de K, na presença de 5 níveis de calcário dolomítico calcinado.

Foram avaliadas a disponibilidade de K no complexo coloidal e na solução do solo, na época anterior e posterior ao cultivo das plantas; a produção de material vegetal da parte aérea no florescimento e no final do ciclo das plantas; a produção de material vegetal do sistema radicular no final do ciclo das plantas; a produção de grãos da soja, além dos teores de K, Ca e Mg na folha diagnóstica e as respectivas quantidades acumuladas pela parte aérea das plantas. Os resultados da avaliação do material vegetal foram, ainda, correlacionados com os resultados de disponibilidade de K no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Com exceção do nitrogênio, fixado simbioticamente, o potássio é o nutriente mais extraído pela soja e o que se apresenta em maiores concentrações nos tecidos (Tanaka & Mascarenhas, 1992). A maior exigência do K ocorre no estágio de crescimento vegetativo da soja, apresentando a velocidade de absorção máxima do nutriente nos trinta dias que antecedem ao florescimento. Dos resultados de três anos de cultivo da soja, cultivar Santa Rosa, foi estimada exigência média de 31,4 kg de K por tonelada de grãos produzida, 56% dos quais seriam exportados pela colheita dos grãos (Bataglia & Mascarenhas, 1977).

Apesar dessa elevada exigência em K, foram verificados poucos os trabalhos nos quais observaram-se respostas dessa cultura à adubação potássica. Os fatores que determinaram a ausência deste efeito foram relacionados ao tipo de solo, ao nível do nutriente no solo, a exigência nutricional do cultivar e o tempo de duração reduzido dos experimentos, além da aplicação inadequada do fertilizante (Yamada & Borkert, 1992).

A utilização do teor de K trocável como índice de avaliação do K disponível do solo e, indicador de classes de fertilidade de K, também pode não ser adequado para a recomendação da adubação potássica. Devido à elevada mobilidade do nutriente no solo, este índice utilizado isoladamente não representa, de maneira eficiente, a disponibilidade do K em solos com características mineralógicas, físicas e químicas distintas (Meurer & Anghinoni, 1993).

Além disso, as plantas podem utilizar-se de formas de K não trocável, liberadas durante o ciclo da cultura (Rosolem & Nakagawa, 1985; Rosolem et al., 1988; Rosolem et al., 1993). As quantidades e a velocidade de liberação, no entanto, são dependentes das características mineralógicas dos solos e, em geral, tão menores quanto maior o grau de intemperização dos solos (Meurer & Rosso, 1997).

Todo esse processo dinâmico do K nos solos tem como consequência uma diversidade de valores críticos de K trocável, encontrados na literatura, para a obtenção da produção relativa máxima de grãos (Borkert et al., 1993a; Mascarenhas et al., 1981 e Rajj & Mascarenhas, 1976).

Até a década de 70, os estudos sobre adubação potássica em soja, no Estado de São Paulo, mostravam elevações esporádicas na produtividade. A principal razão apontada para essa falta de resposta era o teor de K trocável nos solos (Mascarenhas et al., 1987), que se encontrava, em sua maioria, nas faixas de teores médios e altos, superiores a $1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K (Gargantini et al. 1970).

No início da década de 80, os primeiros sintomas de deficiência de K em soja foram observados no campo. Além da clorose das margens dos folíolos evoluindo para necrose, haste verde e retenção foliar, mau pegamento de vagens, formação de frutos partenocárpicos, redução da qualidade fisiológica e sanitária das sementes foram verificados, evidenciando-se também queda nos rendimentos de grãos (Mascarenhas et al., 1987).

Os sintomas de deficiência de K estavam relacionados às áreas produtoras de soja que sofreram esgotamento das reservas de potássio. A principal razão era a utilização contínua de fórmulas contendo quantidades reduzidas de potássio, inferiores às quantidades exportadas pela colheita das sementes. O processo também foi agravado

pela adoção de cultivares melhorados geneticamente para a obtenção de elevadas produtividades e pelo uso intensivo da terra com a implantação dos programas de sucessão de culturas, exigindo assim, uma maior demanda por nutrientes naquelas áreas (Mascarenhas et al., 1987).

A redução dos teores de K disponíveis, em áreas sob cultivos sucessivos de soja, tem ocorrido mesmo quando quantidades de 33 a 66 kg ha⁻¹ de K têm sido aplicadas anualmente. Nesses casos, foram verificadas reduções nos teores de K foliar, relacionadas às deficiências visuais e, também, reduções na produtividade de grãos em solos distróficos e álicos (Borkert et al., 1997a; Mascarenhas et al., 1981; Rosolem et al., 1984). Esses efeitos também têm ocorrido, contudo, mais lentamente, em solos eutróficos submetidos a cultivos sob adubação potássica residual (Borkert et al., 1997b).

Ainda assim, dependendo do tipo de solo e dos seus respectivos teores de K, a cultura da soja não tem apresentado respostas à produção de grãos, para as aplicações de K superiores a 66 kg ha⁻¹, apesar de serem verificados aumentos na concentração de K nas folhas e nos grãos (Borkert et al., 1993b; Borkert et al., 1997a).

Os principais efeitos do K sobre a produção devem ser, portanto, indiretos e relacionados com a qualidade fisiológica e fitossanitária dos grãos, além do aumento do teor de óleo (Mascarenhas et al., 1994). A nutrição adequada em potássio, além de garantir uma maior resistência das plantas às doenças, têm importância no rendimento da colheita mecânica da soja. Plantas deficientes em potássio têm seu processo de senescência atrasado, resultando em retenção foliar e haste verde no estágio de maturação fisiológica dos grãos (Mascarenhas et al., 1987), dificultando a colheita e aumentando as perdas nessa etapa.

A disponibilidade de K no solo e a sua absorção pelas plantas parecem estar relacionadas com a disponibilidade dos cátions divalentes, Ca e Mg, dominantes do complexo de troca. Estes cátions competem entre si pelos sítios de adsorção não específica no complexo de troca e, também, pelo balanço de absorção catiônica das plantas. Isso se torna evidente, a partir das observações de que, a soma de cátions na planta ou num tecido da planta, apresenta uma frequência de alteração reduzida, apesar de existirem variações nos níveis individuais dos cátions absorvidos (Carmello, 1989).

O principal mecanismo de contato entre o íon K^+ da solução do solo e as raízes da planta é o de difusão (Mengel & Kirkby, 1987). A absorção do potássio ocorre em duas etapas. A primeira é passiva, quando o cátion percorre os espaços intercelulares e atinge a parede celular por difusão facilitada. A segunda é ativa, pois ocorre contra o gradiente de concentração. Nesta etapa, o K^+ se combina a um carregador e atravessa a membrana plasmática e o tonoplasto, atingindo o vacúolo (Mengel & Kirkby, 1987).

A absorção do K pelas plantas é favorecida em comparação com outras espécies catiônicas. Dentre os cátions macronutrientes, ele é o que se apresenta, em geral, em menor e maior concentração no solo e na planta, respectivamente. Por essa razão, o balanço do K em relação aos outros cátions no solo determina as quantidades absorvidas, tanto de K como dos demais cátions.

Qualquer prática de manejo que promova alteração na concentração dos cátions disponíveis no solo pode, portanto, influenciar na absorção de K, Ca e Mg, além de outros cátions pelas raízes das plantas. A calagem, necessária aos solos ácidos, promove o aumento nas concentrações de Ca e Mg do solo, relativamente à do K, reduzindo sua concentração em solução e, muito embora mantenha o nível de K

trocável e até aumente sua capacidade tampão, pode, contudo, reduzir a absorção de K pelas raízes e provocar sua deficiência nos tecidos (Goedert et al., 1975).

No entanto, a neutralização dos íons H^+ , pela prática da calagem, promove o aumento do pH, com conseqüente aumento na concentração de bases no complexo de troca (V%) (Catani & Gallo, 1955), principalmente Ca e Mg. Dessa forma, a calagem favorece a manutenção do teor de K trocável do solo, pois aumenta a capacidade de troca de cátions efetiva, reduzindo suas perdas por lixiviação.

Em certos casos, a o aumento da disponibilidade de K às plantas pode ser maior do que a de Ca e Mg e, assim, aumentar a absorção de K pelas raízes (Barber & Humbert, 1963). No entanto, esta maior disponibilidade deve-se ao menor grau de atração do K pelas cargas negativas coloidais e não pelo aumento do teor trocável, estabelecendo, portanto, a condição de que a relação entre os teores disponíveis de (Ca+Mg) e de K não seja muito elevada (Usherwood, 1982).

Para o crescimento ótimo das culturas, principalmente em solos altamente intemperizados, e com valores de pH baixos, devem existir no solo um equilíbrio ideal entre os cátions e uma saturação por bases elevada, para que a concentração individual de cada nutriente também seja ótima (McLean, 1984). Numa das primeiras tentativas de se estabelecer as melhores condições de absorção dos cátions, determinou-se que o balanço ideal de cátions no complexo de troca deveria estar ocupado por 65% de Ca^{2+} , 10% de Mg^{2+} , 5% de K^+ e 20% de H^+ , perfazendo uma saturação igual a 80% (Bear & Toth, 1948). No entanto, essa proporção é variável com a cultura, o tipo de solo e também com o nível de saturação por bases.

Alguns trabalhos têm evidenciado que a resposta da soja à fertilização potássica é dependente da relação $(Ca+Mg)/K$ trocável nos solos. Por esse conceito de avaliação, as produtividades mais elevadas seriam alcançadas quando seus valores se encontrassem entre 22 e 31 (Mascarenhas et al., 1987; Mascarenhas et al., 1988) ou menores que 40 (Rosolem et al., 1992). Contudo, a correlação entre a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo e a produção de matéria seca pelas plantas não tem apresentado resultados satisfatórios para solos e culturas distintos (Usherwood, 1982), inclusive para a soja (Rosolem et al., 1992).

A classificação dos solos em grupos, segundo a mineralogia e a CTC, restringe a variação de Ca e Mg disponíveis no solo aumentando, assim, a correlação entre a saturação da CTC por K trocável (K %) e o K acumulado pelas plantas (Meurer & Anghinoni, 1993). No entanto, isso ocorre porque a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo torna-se sujeita apenas à variação do K.

Portanto, a recomendação de adubação potássica deve considerar o nível de calcário aplicado, uma vez que sua eficiência está relacionada com a correção ou a manutenção da relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo.

A variação da relação dos níveis adequados do K, do Ca e do Mg do solo, altera a disponibilidade destes às plantas, com consequências para a absorção dos nutrientes. Nesses casos, verifica-se um desequilíbrio nutricional, resultando nos sintomas de deficiência de K, quando os valores da relação são superiores aos da faixa ideal (Mascarenhas et al., 1987), entre 1,4 e 1,07, em condições ótimas de disponibilidade de K (Mascarenhas et al., 2000). Por outro lado, quando os valores da relação são inferiores à esta faixa, a absorção de Mg é reduzida, induzindo o aparecimento dos sintomas de deficiência desse nutriente (Miranda et al., 1984).

Apesar das indicações visuais do desequilíbrio nutricional, não tem sido verificadas correlações significativas entre essa relação dos cátions nas folhas e na fase trocável do solo (Usherwood, 1982) ou na produção de grãos (Alvarenga & Lopes, 1988).

Os teores trocáveis desses cátions no complexo de troca, representam as quantidades presentes na solução do solo e adsorvidos aos colóides. No entanto, somente os cátions dissolvidos na solução do solo estão prontamente disponíveis para as plantas. Esta fase, denominada fator intensidade, tem sua concentração de equilíbrio determinada pelos cátions trocáveis, o fator quantidade. A relação que determina o equilíbrio entre as fases é denominada fator capacidade.

Devido à essa relação entre as fases do solo e à elevada mobilidade do K no solo, a utilização dos teores trocáveis e indicadores do fluxo difusivo de potássio conjuntamente, podem representar melhor a disponibilidade deste nutriente (Meurer & Anghinoni, 1993). A atividade do K em solução pode indicar o fluxo difusivo de K, contudo, o conceito de atividade envolve concentração e também força iônica da solução, ou seja presença de outros íons (Wolt, 1994).

Apesar da elevada variabilidade das atividades dos íons em solução, Schofield propôs que, na solução do solo, a atividade do K e a raiz quadrada da atividade dos cátions divalentes apresentavam relação constante, mesmo em uma ampla faixa de diluição (Adams, 1974). Assim, através do estudo da razão entre as atividades desses cátions ($K/(Ca+Mg)^{1/2}$) ou desse valor expresso, em termos de logaritmo negativo e, denominada potencial potássio-cálcio-magnésio ($pK - \frac{1}{2}p(Ca+Mg)$), pode-se definir melhor a disponibilidade imediata de K para as plantas (Fassbender, 1972).

A recomendação da adubação potássica para a cultura da soja, deve considerar, portanto, não só o teor de K trocável mas,

principalmente, o equilíbrio das formas disponíveis dos cátions nos solos. Os parâmetros que descrevem as relações entre os cátions, para os fatores quantidade e intensidade, são complementares na avaliação adequada do sistema solo-planta (Fassbender, 1972). A associação do índice K trocável com parâmetros relacionados ao fluxo difusivo do K ou à sua atividade em solução melhoram a predição da sua disponibilidade às plantas (Meurer & Anghinoni, 1993).

A relação $(Ca+Mg)/K$ trocável nos solos assim como a razão entre as suas atividades $(K^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})^{1/2})$ e o potencial potássio-cálcio-magnésio, devem, portanto, se mostrar mais adequados que o teor de K trocável para os estudos sobre a nutrição potássica.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de instalação do experimento e solo utilizado

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação pertencente ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, em vasos plásticos com 10 dm³ de capacidade.

Foi utilizada a terra da camada 0-20 cm de um Latossolo Vermelho Amarelo álico, horizonte A moderado, textura média, (EMBRAPA - SOLOS, 1999), Typic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 1994). A terra foi seca ao ar e passada em peneira com malha de 2,0 mm. A densidade da terra peneirada foi de 1,27 g cm⁻³.

O solo foi escolhido por não apresentar características de elevada fertilidade e por favorecer a lixiviação de K, considerando-se assim, como um solo crítico para o estudo do nutriente. Além disso, a presença do cultivo de soja sobre este tipo de solo ocorre em grandes áreas do cerrado brasileiro, justificando o seu estudo.

3.2 Caracterização, física, mineralógica e química do solo

A granulometria do LVa foi determinada pelo método do densímetro (Boyucos, 1927), empregada pelo laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP.

O LV apresentou 740 g kg^{-1} , 80 g kg^{-1} e 180 g kg^{-1} de areia, silte e argila, respectivamente. A classificação textural foi considerada média.

A capacidade de retenção de água foi determinada pelo método do torrão separado pela frente de molhamento - TSFM (Costa, 1983). Na capacidade de campo, o solo foi capaz de reter 220 g de água por kg de solo.

O LVa (Typic Hapludox) teve sua mineralogia da fração silte e da fração argila determinadas pelo método de difração de raio-x (Jackson, 1956), realizadas pelo laboratório de Física de Solos do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP. A fração silte apresentou como componentes principais feldspato, pirofilita e quartzo. A fração argila apresentou caulinita, gibsitita e vermiculita e a concentração em óxidos de ferro indicou a presença de mica, magnetita, ilmenita, hematita e goetita.

De acordo com a análise pelo método IAC, as características químicas da terra peneirada do LVa, apresentadas anteriormente ao início dos tratamentos, foram: $4,2 \text{ pH}$ ($\text{CaCl}_2 \text{ } 0,01 \text{ M}$); 10 mg dm^{-3} de P; 48 g dm^{-3} de M.O.; 0,8; 9; 4 e $56 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K, Ca, Mg e H+Al, respectivamente. Além disso, foram calculados: $\text{S} = 13,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{CTC} = 69,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $\text{V} = 20\%$.

3.3 Tratamentos

Os tratamentos aplicados no experimento constaram de dois fatores. O primeiro, condicionou o ambiente em termos de saturação por bases e teores de Ca e Mg. Para isso, utilizou-se um calcário dolomítico calcinado, que apresentava $45\% \text{ CaO} + 21\% \text{ MgO}$ e $\text{PRNT} = 130$, em

cinco níveis (0, 500, 1000, 1500 e 2000 mg dm⁻³). O segundo fator, determinou os níveis de K no solo, pelo fornecimento de sete níveis do nutriente (0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 mg dm⁻³), na forma de KCl (60% K₂O).

Além da ausência de calcário, foram aplicadas duas doses inferiores e duas doses superiores ao valor determinado pela recomendação de calagem pelo método da saturação por bases (Raij et al., 1996), em torno de 1300 mg de calcário por dm³ de solo, necessários para elevar a $V = 70\%$. Em função da composição do material, as quantidades de Ca e Mg fornecidas pela aplicação de calcário foram crescentes em 161 e 63 mg dm⁻³, respectivamente.

Os níveis de K aplicados foram crescentes em 15 mg dm⁻³ até a quantidade equivalente a 2,4 mmolc dm⁻³, valor duas vezes superior ao teor no solo, a partir do qual considera-se que não haja mais aumento da produção, em resposta à adubação potássica (Raij & Mascarenhas, 1976).

3.4 Delineamento experimental

Foi utilizado um delineamento experimental em blocos casualizados, num esquema fatorial 5 x 7, resultando em 35 tratamentos repetidos 4 vezes, totalizando 140 parcelas, representadas por um vaso cada uma.

3.5 Instalação e acompanhamento do experimento

Os trabalhos tiveram início em agosto de 1998, com a coleta da terra, numa área da Fazenda Sertãozinho, em Piracicaba, pertencente ao Departamento de Genética da ESALQ/USP.

Os vasos plásticos foram completados com 10 kg de terra seca ao ar e passada em peneira com malha de 2 mm. Foram aplicados, a seguir, os tratamentos de calagem, identificando-se os vasos com etiquetas. O calcário foi misturado com todo o volume de terra de cada vaso, uniformizando-se a aplicação. Os vasos permaneceram umedecidos a 70% da capacidade de campo e cobertos com material plástico para evitar a perda de água, por um período de incubação de 30 dias, para a reação do calcário.

Ao final do período de incubação, 200 mg dm⁻³ de P, na forma de superfosfato simples moído, foram aplicados a todos os vasos. A seguir, foram aplicados os tratamentos de K, na forma de KCl em solução, nos respectivos vasos identificados anteriormente. Uma solução contendo micronutrientes foi aplicada em todos os tratamentos. Foi fornecido 1,2 mg dm⁻³ de boro na forma de ácido bórico e cobre, manganês e zinco nas formas de cloretos, nas quantidades de 4,2; 8,4 e 4,2 mg dm⁻³ respectivamente.

A umidade do vaso, durante todo o experimento, foi mantida em torno de 70% da capacidade de campo, por meio da reposição diária de água destilada, controlando-se a evapotranspiração pela pesagem dos vasos por amostragem.

Três dias após a aplicação dos níveis de K, foram coletadas amostras de terra de cada vaso para a análise química. Efetuou-se a coleta em cinco pontos por vaso, utilizando amostrador de terra tipo sonda.

A semeadura da soja foi realizada no dia 14 de novembro de 1998, sete dias após a aplicação do K. Foram colocadas 8 sementes do cultivar IAC-17 por vaso, inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* na forma de um inoculante turfoso, na base de 25g de inoculante por kg de semente. Ao inoculante foi adicionado o fertilizante líquido CoMo98, para o fornecimento de Mo e Co, na forma de quelatos, em quantidades de 2,5 e 0,37 g kg⁻¹ de semente, respectivamente.

O desbaste foi feito 10 dias após da emergência, mantendo-se 4 plântulas por vaso.

A coleta da folha diagnóstica (+3) das plantas foi realizada por ocasião do florescimento pleno, estágio R 2 (Fehr & Caviness, 1977), juntamente com a parte aérea de duas plantas de cada vaso, que foram divididas em folhas e hastes. No final do ciclo, estágio R 8 (Fehr & Caviness, 1977), a parte aérea das duas plantas restantes de cada vaso foram coletadas e, separadas em folhas, hastes, vagens e grãos. Coletou-se, ainda, o sistema radicular das quatro plantas de cada vaso.

Todo o material coletado foi lavado em cinco bandejas, contendo água destilada, detergente diluído, água destilada, HCl 0,1 N e água desmineralizada. Todas as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até atingirem peso constante. Foi determinada, a produção de material vegetal, expressa em gramas de material seco de cada uma das partes da planta. Após a pesagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e seguiram para a análise química em laboratório.

Foram determinados os teores de K, Ca e Mg, em g kg⁻¹ de material seco, de cada uma das amostras. Utilizou-se os resultados dos respectivos teores em cada uma das partes das plantas analisadas para a determinação das quantidades de K, Ca e Mg acumuladas pela parte aérea, expressas em mg.

Por ocasião da coleta final do experimento, amostras de terra de cada vaso foram coletadas para a análise química, de acordo com o procedimento adotado na primeira amostragem.

3.6 Análises químicas do material vegetal

Todas as determinações químicas nas amostras de material vegetal foram realizadas no Departamento de Solos e Nutrição de Plantas de ESALQ/USP, conforme a metodologia descrita por Sarruge & Haag (1974), para os teores de potássio, cálcio e magnésio.

A obtenção dos extratos foi realizada por digestão nítrico-perclórica a quente. Alíquotas do extrato foram tomadas para cada nutriente, sendo que o K foi determinado por fotometria de chama e o Ca e o Mg por espectrofotometria de absorção atômica.

3.7 Análises químicas de terra

Seguindo-se o Método IAC, proposto por Raij & Quaggio (1983), nas amostras coletadas antes da semeadura, bem como naquelas coletadas por ocasião do final do experimento, foram determinados os valores pH (CaCl_2 0,01M), e os teores de K, Ca, Mg e H+Al. Foram calculados, também, S, T, V% e a saturação individual da CTC por K, Ca e Mg, para o pH de referência 7.

Uma parte de cada amostra de terra coletada foi utilizada para a extração da solução do solo. A extração da solução do solo foi realizada pelo método da centrifugação modificado (Elkhatib et al.,

1987). A terra apresentava a umidade de 70% da capacidade de campo, nas amostras para a extração da solução.

Foi utilizado para a extração um conjunto de dois tubos, um de nylon e outro de policarbonato sobrepostos. No primeiro, ajustado internamente ao segundo, foi acondicionada a terra. Este continha uma perfuração na base inferior e uma tela para reter a terra. Por esse orifício foi extraída a solução do solo e coletada no segundo tubo, durante a centrifugação. Utilizou-se uma velocidade de rotação de 8800 rpm (13000 g), durante 30 minutos.

O volume de solução do solo coletado variou entre 10 a 12 cm³ por 100 cm³ de terra. Nas soluções coletadas foram avaliados o pH e a condutividade elétrica (CE). Foram também determinadas as concentrações de K (fotometria de chama) e de Ca e Mg (espectrofotometria de absorção atômica).

A estimativa da força iônica (μ) da solução do solo, corrigida para pares de íons, foi calculada por meio da relação com a CE (Gillman & Bell, 1978), utilizando-se a fórmula:

$$\mu = 0,012.CE - 0,0004 \quad r=0,993.$$

Com os valores obtidos para as concentrações totais dos elementos presentes na solução do solo e, da estimativa da força iônica, foram calculados os coeficientes de atividade (f) do K, do Ca e do Mg, de acordo com a fórmula completa de Debye-Hückel, descrita por Wolt (1994):

$$\log f = \frac{- 0,509 \cdot Z^2 \cdot \mu^{1/2}}{1 + 0,33 \cdot a_i^{\circ} \cdot \mu^{1/2}} ;$$

onde Z é a valência do íon, a_i° é o parâmetro correspondente ao tamanho do íon (10^{-1} nanometro) e, μ é a força iônica da solução calculada por:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} m_i z_i^2 ;$$

sendo m_i , a concentração molar do íon. A atividade foi dada pela fórmula:

$$a = f \cdot m_i ;$$

resultando nas atividades do K (a_K) do Ca (a_{Ca}) e do Mg (a_{Mg}).

A relação das atividades foi calculada como sendo $a_K/(a_{Ca}+a_{Mg})^{1/2}$ e o potencial potássio-cálcio-magnésio, considerado o valor expresso em função do logaritmo do inverso das atividades iônicas conforme Fassbender (1972):

$$\text{Potencial de potássio} = pK - \frac{1}{2} p(Ca+Mg).$$

3.8 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi executada através do pacote estatístico SAS (SAS Institute, 1996). Aos resultados, foi aplicado o teste F para a análise da variância. O desdobramento da interação foi realizado naqueles casos em que o teste F revelou-se significativo a 5% e 1%.

Foram calculadas as regressões linear e quadrática, para as doses de calcário, potássio e para as interações significativas. A seleção

das regressões utilizadas para melhor explicar os resultados foi feita em função do valor F de significância e do coeficiente de determinação.

Foram determinadas as correlações entre os resultados de análise de terra e os resultados de análise vegetal, avaliadas através do coeficiente de correlação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de terra

A avaliação das amostras de terra, no período anterior à semeadura, evidenciou as alterações nos teores trocáveis dos cátions do solo, em função da aplicação de calcário e de potássio (Tabelas 01 e 03). Não houve, contudo, efeito significativo da interação dos tratamentos, o qual era esperado, em virtude da competição entre os cátions no complexo de troca do solo.

Tabela 01 - Análise de terra anterior à semeadura da soja, em função da aplicação de calcário.

Dose de Calcário	pH ¹	K	Ca	Mg	CTC	V	$\frac{K}{CTC}$	$\frac{Ca}{CTC}$	$\frac{Mg}{CTC}$	$\frac{Ca+Mg}{K}$
mg dm ⁻³		-----mmolc dm ⁻³ -----					-----%-----			
0	4,5	2,1	16,2	4,8	69,1	35	3,0	24,5	7,5	13
500	4,8	1,6	22,8	7,4	71,1	45	2,2	32,5	10,5	23
1000	5,2	2,0	29,7	10,4	71,5	59	2,8	41,4	14,7	25
1500	5,5	1,7	34,0	12,8	72,6	67	2,2	46,8	17,7	35
2000	5,8	1,5	40,4	14,9	77,2	73	2,0	52,1	19,3	42
Fquadrática	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**
R ²	1,00	0,40	1,00	1,00	0,93	0,99	0,56	1,00	0,98	0,97

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).

* e ** significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
média de 28 repetições.

Os teores trocáveis de Ca e Mg elevaram-se, em média, 6,1 e 2,5 mmol_c dm⁻³ para cada aumento da dose de calcário aplicada, independente da dose de K. O pH aumentou de 4,5 para 5,8 e a saturação por bases (V%), que inicialmente era de 35%, atingiu 73% na maior dose aplicada. Todas essas respostas mostraram-se, na prática, lineares, apesar do maior grau de ajuste ao modelo quadrático.

Os teores trocáveis de K foram reduzidos em resposta à aplicação do calcário, consequência do aumento da disponibilidade do Ca e do Mg. Em relação à CTC, para o pH de referência 7, a saturação por K foi reduzida de 3 para 2%, enquanto a de Ca foi aumentada de 24 para 52% e a de Mg teve um incremento de 7,5 para 20%. Os valores indicam o desbalanço dos cátions tanto nas menores doses, quanto nas superiores.

De acordo com os valores propostos por Bear & Toth (1948), o K manteve-se em nível abaixo do adequado, enquanto o teor de Mg em relação aos demais tornou-se excessivo, com a aplicação das maiores doses de calcário. A relação dos cátions (Ca+Mg)/K, que aumentou de 13 para 42, também indicou a redução da disponibilidade relativa do K.

O efeito negativo da calagem sobre o teor trocável de K, foi observado em consequência da utilização das médias dos tratamentos de K. Apesar de não ter sido verificado o efeito significativo da interação da aplicação de calcário com a aplicação de K, o desdobramento revelou a tendência de redução dos teores de K trocável pela calagem, somente quando as maiores quantidades de K foram aplicadas no solo. Quando os teores trocáveis de K se encontravam em níveis abaixo de 1,2 mmol_c dm⁻³ na ausência de calagem, o aumento das doses de calcário favoreceu a manutenção do K trocável no solo (Tabela 02), como sugerido por Barber & Humbert (1963).

Tabela 02 - Potássio trocável no solo, no período anterior à semeadura, em função da aplicação de calcário e de potássio.

Dose de Calcário	Dose de Potássio						
	-----mg dm ⁻³ -----						
	0	15	30	45	60	75	90
mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						
0	0,8	1,1	1,7	2,9	3,4	2,2	2,4
500	0,7	1,2	1,2	1,3	1,9	2,0	2,7
1000	0,9	1,2	1,5	2,4	2,5	2,9	2,5
1500	1,0	1,0	1,1	1,6	2,0	2,3	2,6
2000	0,8	1,0	1,4	1,9	2,1	1,5	1,9
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns não significativo pelo teste F.
média de 4 repetições.

Tabela 03 - Análise de terra anterior à semeadura da soja, em função da aplicação de potássio.

Dose de Potássio	pH ¹	K	Ca	Mg	CTC	V	$\frac{K}{CTC}$	$\frac{Ca}{CTC}$	$\frac{Mg}{CTC}$	$\frac{Ca+Mg}{K}$
mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----				
0	5,2	0,8	28,6	9,8	68,4	57	1,2	41,2	14,2	48
15	5,2	1,1	28,6	9,9	71,3	55	1,6	40,0	13,9	37
30	5,2	1,4	27,6	10,0	71,5	55	2,0	38,8	14,2	30
45	5,1	2,0	29,6	10,5	74,2	56	2,8	39,3	14,1	23
60	5,2	2,4	29,5	10,5	74,7	57	3,3	39,5	14,2	20
75	5,1	2,2	27,9	9,8	72,6	55	3,1	38,6	13,6	20
90	5,1	2,4	28,4	9,8	73,5	56	3,3	38,8	13,4	18
Fquadrática	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	**
R ²		0,94					0,94			0,99

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).

** significativo a 1% pelo teste F.

ns não significativo pelo teste F.
média de 20 repetições.

Somente o teor de K trocável no solo aumentou com a aplicação crescente de K, independente da quantidade de calcário aplicada (Tabela 03). Seguindo uma tendência de resposta quadrática, o teor no solo aumentou de 0,8 para 2,4 mmol_c dm⁻³ na maior dose aplicada. Pelo critério do nível crítico, esse maior valor encontra-se na classe de teor médio (Raij & Mascarenhas, 1976; Raij et al., 1996) ou alto (Borkert et al., 1993a). Contudo, o K%/CTC aumentou de 1,2 para 3,3%, considerado baixo (Bear & Toth, 1948), e a relação (Ca+Mg)/K reduziu de 48 para 18, indicando uma disponibilidade relativa de K acima dos valores adequados para a soja (Mascarenhas et al., 1987).

A análise da solução do solo mostrou aumentos do pH, da CE e da força iônica (μ) em função da aplicação de calcário. As atividades do Ca e do Mg também aumentaram e a do K diminuiu, da mesma forma que os teores trocáveis desses cátions. Os valores da relação das atividades em solução e do potencial potássio-cálcio-magnésio ($pK - \frac{1}{2}p(Ca+Mg)$) também indicaram diminuição da disponibilidade do K em relação aos outros dois cátions (Tabela 04).

A aplicação de K não resultou em alteração do pH da solução do solo, mas propiciou aumentos da CE, além da μ e das atividades do K, do Ca e do Mg em solução (Tabela 05).

A maior dose de K aplicada resultou em uma atividade do K cinco vezes superior à apresentada na ausência da adubação. Mesmo com o aumento da μ e a consequente redução dos coeficientes de atividade dos íons, as atividades do Ca e o Mg foram elevadas em 20%, indicando o deslocamento de Ca e Mg adsorvidos para a solução do solo, proporcionado pelo aumento do K em solução. Como os aumentos das atividades do Ca e do Mg foram relativamente menores que os da atividade de K, a relação das atividades e o potencial indicaram o aumento da disponibilidade relativa do nutriente em solução.

Tabela 04 - Análise da solução do solo anterior à semeadura da soja, em função da aplicação de calcário.

Dose de Calcário	pH ¹	CE	a K	a Ca	a Mg	μ	$\frac{a K}{a(Ca+Mg)^{1/2}}$	$pK - \frac{1}{2} p(Ca+Mg)$
mg dm ⁻³		mS cm ⁻¹ a 25°C	-----mmol dm ⁻³ -----				10 ⁻³ (mol dm ⁻³) ^{-1/2}	
0	5,7	4,3	3,1	5,2	2,2	51,2	35	1,53
500	6,0	4,9	2,7	5,6	3,3	58,4	28	1,62
1000	5,9	5,5	2,5	6,9	4,2	65,8	24	1,70
1500	6,0	6,0	2,6	7,0	4,8	71,4	24	1,69
2000	6,2	6,3	2,5	7,1	5,4	75,7	23	1,72
Fquadrática	**	**	*	**	**	**	**	**
R ²	0,81	1,00	0,94	0,92	1,00	1,00	0,99	0,97

¹ H₂O.

* e ** significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
média de 28 repetições.

Tabela 05 - Análise da solução do solo anterior à semeadura da soja em função da aplicação de potássio.

Dose de Potássio	pH ¹	CE	a K	a Ca	a Mg	μ	$\frac{a K}{a(Ca+Mg)^{1/2}}$	$pK - \frac{1}{2} p(Ca+Mg)$
mg dm ⁻³		mS cm ⁻¹ a 25°C	-----mmol dm ⁻³ -----				10 ⁻³ (mol dm ⁻³) ^{-1/2}	
0	6,0	4,2	0,9	5,7	3,6	50,0	9	2,05
15	6,0	4,7	1,3	6,0	3,8	56,6	13	1,89
30	5,9	5,1	1,9	6,5	4,0	61,2	19	1,74
45	6,0	5,3	2,4	6,8	4,0	63,8	24	1,63
60	5,9	5,7	3,2	6,3	4,1	68,6	32	1,50
75	6,0	6,3	4,3	6,5	4,2	75,0	43	1,38
90	5,9	6,4	4,6	6,7	4,2	76,3	46	1,36
Fquadrática	ns	**	**	*	**	**	**	**
R ²		0,99	0,99	0,68	0,95	0,99	0,99	1,00

¹ H₂O.

* e ** significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
ns não significativo pelo teste F.
média de 20 repetições.

Ao final do período de cultivo da soja, houve variações significativas do pH do solo e dos teores dos cátions trocáveis, além da V% e da relação dos cátions, em função das quantidades de calcário aplicadas (Tabela 06).

O cultivo da soja favoreceu uma pequena redução do pH do solo em todos os tratamentos. Ainda assim, ficou evidente o efeito das doses de calcário, independente da quantidade de K aplicada. Os teores trocáveis do Ca e do Mg mantiveram uma resposta positiva à aplicação de calcário, enquanto que o teor de K trocável foi reduzido. O K%/CTC foi reduzido nas maiores doses, mas esteve sempre abaixo de 1%, mesmo quando não foi aplicado calcário. A relação (Ca+Mg)/K final aumentou significativamente com as doses de calcário e atingiu valores elevados nas maiores doses. O teor de Mg que, inicialmente encontrava-se em valores elevados em relação ao Ca e ao K, teve seu teor relativo diminuído ao final do ciclo, resultando em valores médios, 4,5 a 5 vezes menores que o Ca.

Tabela 06 - Análise de terra após o ciclo da soja em função da aplicação de calcário.

Dose de Calcário	pH ¹	K	Ca	Mg	CTC	V	$\frac{K}{CTC}$	$\frac{Ca}{CTC}$	$\frac{Mg}{CTC}$	$\frac{Ca+Mg}{K}$
mg dm ⁻³		-----mmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----			
0	4,3	0,5	12,4	1,9	64,8	23	0,7	19,4	3,1	33
500	4,5	0,4	16,8	3,0	61,6	33	0,6	27,2	4,9	57
1000	4,9	0,3	22,2	4,4	60,3	45	0,6	36,8	7,3	84
1500	5,3	0,3	27,7	6,2	59,2	58	0,6	46,8	10,5	113
2000	5,6	0,3	33,4	7,9	63,1	66	0,5	53,0	12,5	150
Fquadrática	**	**	**	**	*	**	**	**	**	**
R ²	0,99	0,92	1,00	1,00	0,92	0,99	0,89	1,00	0,99	1,00

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).

* e ** significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F. média de 28 repetições.

Durante o cultivo da soja, o K trocável foi severamente reduzido, tornando-se, ao final do estudo, limitante em todos os tratamentos, de acordo com o critério do nível crítico (Borkert et al., 1993a; Rajj & Mascarenhas, 1976). Mesmo nas maiores doses de K aplicadas, o teor final de K trocável não diferiu dos solos onde o nutriente não havia sido aplicado. O pH e os teores de Ca e Mg, avaliados ao final do ciclo, também não foram influenciados significativamente pelas doses de K. A relação (Ca+Mg)/K final, que não diferiu entre os tratamentos, mostrou-se elevada, mesmo nas maiores doses de K aplicadas. (Tabela 07).

Tabela 07 - Análise de terra após o ciclo da soja em função da aplicação de potássio.

Dose de Potássio	pH ¹	K	Ca	Mg	CTC	V	$\frac{K}{CTC}$	$\frac{Ca}{CTC}$	$\frac{Mg}{CTC}$	$\frac{Ca+Mg}{K}$
mg dm ⁻³		-----mmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----			
0	5,0	0,3	23,2	4,6	61,2	46	0,5	38,1	7,6	97
15	4,9	0,4	22,9	4,5	61,0	45	0,6	37,6	7,3	91
30	4,9	0,4	22,5	4,4	61,4	45	0,6	36,9	7,3	82
45	4,9	0,4	22,0	4,7	60,3	45	0,6	36,7	7,8	82
60	4,9	0,4	23,3	4,9	64,9	45	0,6	36,7	7,6	87
75	4,9	0,4	22,2	4,9	62,4	44	0,6	35,5	7,9	91
90	4,9	0,4	21,5	4,8	61,5	44	0,6	35,0	7,9	82
	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).
 ns não significativo pelo teste F.
 média de 20 repetições.

O LV utilizado no estudo, contendo 180 g kg⁻¹ de argila, e uma CTC inicial de aproximadamente 70 mmol_c dm⁻³ mostrou reduzida capacidade de manutenção do K trocável após o cultivo da soja.

Os teores trocáveis de K foram reduzidos a valores muito baixos em todos os tratamentos, sendo encontrados valores médios de 0,3 a 0,5 mmol_c dm⁻³ ao final do ciclo, até mesmo quando doses de 90 mg dm⁻³ de K foram aplicadas. Não foram determinadas formas de K não trocável (extração com HNO₃ 1N a quente), mas parece pouco provável a sua formação, em função da mineralogia oxidica da fração argila do solo que apresenta principalmente caulinita e óxidos de ferro e alumínio e quantidades restritas de vermiculita.

A elevada variação nos teores de K trocável em função do cultivo pode indicar uma elevada disponibilidade do K para as plantas, mas também pode representar uma alta suscetibilidade ao processo de perdas por lixiviação, o que limita a utilização de quantidades elevadas de K aplicadas de uma só vez. Ainda assim, verificou-se que esta classe de solo, mesmo com reduzida quantidade de argila, pode manter o teor de K trocável após cultivos sucessivos, quando houver reposições superiores a 33 mg dm⁻³ de K e exportação apenas dos grãos colhidos ou superiores a 66 mg dm⁻³ de K, nos casos de retirada de todos os restos vegetais (Rosolem et al., 1984).

A relação (Ca+Mg)/K trocável aumentou com o cultivo, atingindo, independente da dose de K aplicada, valores superiores a 80 e variação não significativa. Essa redução da disponibilidade K relativa aos teores de Ca e Mg evidencia a necessidade de aplicação de K a cada novo cultivo para o restabelecimento do balanço catiônico adequado no solo. Para que a nutrição potássica da soja seja adequada, os valores máximos recomendados para a relação (Ca+Mg)/K trocável no solo não devem ser superiores a 40 (Rosolem et al., 1992).

Apresentando a mesma tendência dos teores trocáveis, as atividades do Ca e do Mg aumentaram em função da aplicação de calcário, enquanto que a atividade do K reduziu. A relação das atividades foi, portanto, reduzida de $8 \cdot 10^{-3}$ para $2,4 \cdot 10^{-3} (\text{mol dm}^{-3})^{-1/2}$ e, o $\text{pK} - \frac{1}{2}\text{p}(\text{Ca}+\text{Mg})$ aumentado de 2,1 para 2,6. Em geral, a concentração salina da solução foi aumentada, como indicam a CE e a μ (Tabela 08).

Tabela 08 - Análise da solução do solo após o ciclo da soja em função da aplicação de calcário.

Dose de Calcário	pH ¹	CE	a K	a Ca	a Mg	μ	$\frac{a \text{ K}}{a(\text{Ca}+\text{Mg})^{1/2}}$	$\text{pK} - \frac{1}{2} \text{p}(\text{Ca}+\text{Mg})$
mg dm ⁻³		mS cm ⁻¹ a 25°C	-----mmol dm ⁻³ -----				10 ⁻³ (Mol dm ⁻³) ^{-1/2}	
0	5,4	0,82	0,30	1,27	0,31	7,3	8,1	2,13
500	5,4	0,96	0,18	1,69	0,44	8,3	4,1	2,42
1000	5,5	1,28	0,21	2,31	0,78	11,1	4,0	2,41
1500	5,9	1,32	0,18	2,36	0,91	11,5	3,2	2,50
2000	6,1	1,75	0,16	3,22	1,38	15,2	2,4	2,63
Fquadrática	**	**	**	**	**	**	**	**
R ²	0,97	0,96	0,75	0,95	0,98	0,96	0,90	0,90

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).

** significativo a 1% pelo teste F.
média de 28 repetições.

Após o cultivo, as atividades do K, do Ca e do Mg em solução foram elevadas de maneira equivalentes, em torno de 40%, em função da aplicação crescente de K. Desta forma, a disponibilidade relativa do K em solução não foi influenciada pelas doses de K. A relação das atividades e o $\text{pK} - \frac{1}{2}\text{p}(\text{Ca}+\text{Mg})$ variaram de 4,3 a 5,3 e de 2,49 a 2,35, respectivamente (Tabela 09).

Tabela 09 - Análise da solução do solo após o ciclo da soja em função da aplicação de potássio.

Dose de Potássio	pH ¹	CE	a K	a Ca	a Mg	μ	$\frac{a K}{a(Ca+Mg)^{1/2}}$	$pK - \frac{1}{2} p(Ca+Mg)$
mg dm ⁻³		mS cm ⁻¹ a 25°C	-----mmol dm ⁻³ -----				10 ⁻³ (Mol dm ⁻³) ^{-1/2}	
0	5,8	0,90	0,18	1,71	0,58	7,9	4,3	2,49
15	5,7	0,93	0,17	1,69	0,53	8,2	3,9	2,44
30	5,7	1,07	0,18	1,95	0,64	9,4	4,2	2,42
45	5,6	1,33	0,20	2,39	0,86	11,5	4,1	2,43
60	5,6	1,45	0,22	2,56	0,94	12,6	4,3	2,41
75	5,6	1,42	0,22	2,45	0,91	12,4	4,5	2,39
90	5,6	1,46	0,26	2,43	0,89	12,7	5,3	2,35
Fquadrática	*	**	**	*	**	**	ns	ns
R ²	0,84	0,93	0,97	0,87	0,83	0,93		

¹ CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (1 : 2,5).

* e ** significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

ns não significativo pelo teste F.
média de 20 repetições.

Aqueles valores indicam que, relativamente ao Ca e ao Mg, a atividade do K em solução mostrou-se inferior ao valor adequado, já que o nível ótimo do potencial encontra-se ao redor de 2 (Woodruff, 1955). De acordo com Magdoff & Bartlett (1980), seria necessária a aplicação ao solo de até 55 mg dm⁻³ de K para a correção do nível de K em solução, reduzindo o potencial de 2,5 para 2, naqueles solos que não receberam adubação potássica. Essa quantidade de K a ser repostada está de acordo com o valor encontrado por Rosolem et al. (1984), para a manutenção dos teores adequados de K trocável nos solos com textura média a arenosa, ou seja, que apresentam menor poder tampão.

4.2 Análise do material vegetal

As aplicações de calcário e potássio promoveram respostas positivas sobre a produção de material vegetal seco da parte aérea das plantas de soja avaliadas no florescimento (Figuras 01 e 02). Entretanto, a interação dos tratamentos não se mostrou significativa.

Figura 01 - Produção de material vegetal seco das frações da parte aérea da soja, no período do florescimento, em função das doses de calcário.

Os aumentos verificados em função da calagem variaram de 60% para a produção de hastes a 80% para a produção de folhas, resultando num aumento médio de 70% para a produção de material seco na parte aérea das plantas da maior dose. Todo esse aumento ocorreu não só pelo fornecimento de Ca e Mg pelo calcário, mas

também, pela melhoria no ambiente radicular com o aumento do pH, a redução da saturação por Al e a elevação da CTC efetiva.

Folhas e hastes tiveram aumentos equivalentes de produção devidos ao K aplicado, atingindo, na maior dose, 40% de aumento do material seco da parte aérea (Figura 02). Aumentos de 15% também foram verificados na produção de hastes e folhas de plantas de soja que receberam adubação de 60 mg dm^{-3} de K (Rossetto et al., 1995). A resposta, em produção, ao K aplicado está relacionada com o aumento do teor de K trocável e com a redução da relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ no solo de 48 para 18 (Tabela 03) e também com o aumento da atividade do K, tanto na solução do solo quanto em relação às atividades do Ca e do Mg (Tabela 05).

Figura 02 - Produção de material vegetal seco das frações da parte aérea da soja, no período do florescimento, em função das doses de K.

A resposta ao K, tanto na produção vegetativa quanto na produção de grãos, geralmente ocorre em solos com reduzida disponibilidade do elemento. Contudo, devido à grande capacidade da soja em extrair K do solo, a produção de material seco pode não ser ampliada pela adubação potássica, mesmo naqueles solos com reduzida disponibilidade do nutriente (Rosolem et al., 1993). Nesse caso, ocorrem aumentos nas concentrações do nutriente nos tecidos, acompanhados de uma melhora na qualidade fisiológica das plantas, bem como a redução dos problemas de haste verde e retenção foliar.

Os acúmulos do Ca e do Mg pela parte aérea das plantas também foram influenciadas positivamente pela calagem (Figura 03).

Figura 03 - Acumulação de nutrientes pela parte aérea da soja, no período do florescimento, em função das doses de calcário.

Devido à maior disponibilidade no solo, as plantas acumularam, na presença da maior dose de calcário, duas e três vezes mais Ca e Mg, respectivamente. Apesar do aumento do material vegetal seco produzido, a quantidade de K acumulada não foi influenciada significativamente pela calagem, mostrando haver efeito de diluição do potássio no tecidos vegetais. Contudo, a capacidade das plantas em absorver esse nutriente do solo aumentou, uma vez que a calagem determinou a redução do teor de K trocável no solo.

Quando avaliada em função da aplicação de K, a acumulação de nutrientes pela parte aérea da soja mostrou resposta positiva linear. As plantas que receberam a maior dose acumularam, relativamente, três vezes mais K do que as plantas não adubadas (Figura 04).

Figura 04 - Acumulação de nutrientes pela parte aérea da soja, no período do florescimento, em função das doses de K.

O elevado aproveitamento do K aplicado ocorreu sem um correspondente aumento de produção de material vegetal. A soja apresenta, portanto, uma tendência de acúmulo de K nos tecidos, quando o nutriente se torna mais disponível no solo, fato esse verificado por outros autores (Rosolem et al., 1993; Rossetto et al., 1995). Esse aumento da concentração de K nos tecidos têm se mostrado benéfico, pois está diretamente relacionado à qualidade fisiológica e fitossanitária das plantas (Mascarenhas et al., 1994). Plantas bem nutridas em potássio têm sua resistência ao ataque de pragas e doenças aumentada e o processo de senescência da parte vegetativa acompanha a translocação de fotoassimilados e a maturação dos grãos, reduzindo os problemas de haste verde e retenção foliar, que prejudicam a colheita mecanizada.

A acumulação de Ca foi aumentada em 20%, mantendo-se sempre superior à acumulação de K. A acumulação de Mg, ao contrário, foi reduzida em 20% na maior dose de K aplicado, evidenciando a competição pela absorção e a alteração do balanço catiônico na planta.

A interação dos tratamentos mostrou-se significativa para os resultados da acumulação de Mg. A tendência foi sempre de aumento da acumulação com a calagem e redução da quantidade acumulada com o aumento da adubação potássica (Figura 05). Contudo, nota-se que o aumento da quantidade de Mg acumulada em função da calagem foi menos acentuado, quando as maiores doses de K foram aplicadas.

A principal causa desse efeito é a competição entre os cátions disponíveis no solo. A absorção de Mg pela soja é mais uma função do K disponível do que propriamente do Mg trocável no solo (Rosolem et al., 1992). Na ausência de adubação potássica, a relação $(Ca+Mg)/K$ no solo e o $pK - \frac{1}{2}p(Ca+Mg)$ variaram, com a calagem, de 25

a 69 e de 1,85 a 2,17. Com a aplicação da maior dose de K, esses índices variaram de 11 a 27 e de 1,14 a 1,46, respectivamente. O aumento relativo da disponibilidade do K trocável e da sua atividade em solução é que determinou, portanto, a diminuição na taxa de absorção de Mg pela soja.

Figura 05 - Acumulação de Mg pela parte aérea da soja, no período do florescimento, em função das doses de K e dos níveis de calcário.

Os teores de K, Ca e Mg na folha diagnóstica foram influenciados significativamente pela aplicação de calcário. Enquanto os teores de Ca e Mg foram aumentados, o teor de K foi reduzido (Figura 06).

Figura 06 - Teores foliares de K, Ca e Mg, no período do florescimento, em função das doses de calcário.

Os teores de Ca variaram de 9,1 a 11 g kg^{-1} e os de Mg de 2,4 a 4,3 g kg^{-1} . Esses valores encontram-se dentro dos níveis de suficiência (Ohlrogge & Kamprath, 1968). Os teores foliares de K, que não estavam adequados na ausência da calagem, foram reduzidos pela competição gerada pelo aumento da disponibilidade de Ca e Mg no solo, atingindo valores mínimos de 5,5 g kg^{-1} , e apresentaram sintomas de deficiência.

O teor foliar que indica o nível crítico de suficiência em K para a soja é de 17 g kg^{-1} (Borkert et al., 1993b; Ohlrogge & Kamprath, 1968). Plantas com sintomas de deficiência de K apresentam teores inferiores a 12,5 g kg^{-1} e, valores entre 12,5 e 17 g kg^{-1} indicam fome oculta (Borkert et al., 1993b).

Com a aplicação de K (Figura 07), esse nutriente teve seu teor nas folhas aumentado de 5 para 10,1 g kg⁻¹, considerado ainda deficiente para a soja (Borkert et al., 1993b). Os sintomas de deficiência de K já eram característicos nas folhas mais velhas das plantas que receberam até 30 mg dm⁻³ de K, dependendo do nível de calcário aplicado.

Figura 07 - Teores foliares de K, Ca e Mg, no período do florescimento, em função das doses de K.

O aumento da disponibilidade do K no solo, gerado pelo aumento das quantidades aplicadas, determina um efeito antagônico do K absorvido sobre a absorção de Ca e de Mg (Borkert et al., 1997a; Borkert et al., 1997b). O teor de Ca foi pouco reduzido pelo aumento na absorção de K. A variação foi de 11,1 a 9,5 g kg⁻¹ na maior dose de K aplicada, mantendo-se na faixa ideal. A redução do teor foliar de Mg foi

mais acentuada, de 4,2 para 2,8 g kg⁻¹, próximo ao limite inferior de suficiência (Ohlrogge & Kamprath, 1968). O efeito competitivo do K é maior, portanto, sobre esse nutriente do que sobre o Ca, o qual apresenta-se como cátion dominante da solução do solo.

A interação das doses de calcário e K aplicadas influenciou significativamente o teor de K nas folhas (Figura 08). Os maiores teores foliares de K foram verificados na ausência de calagem, independente do nível de K aplicado. Neste caso, a resposta à aplicação de K foi quadrática devido ao efeito de concentração do nutriente nas doses inferiores, as quais obtiveram as menores produções de material vegetal. A partir de 30 mg dm⁻³ de K aplicados, a tendência foi de resposta positiva para a aplicação de K, aumentando de 8,8 para 11,2 g kg⁻¹ os teores foliares.

Figura 08 - Teores foliares de K, no período do florescimento, em função das doses de K e níveis de calcário.

Na presença de calcário, a resposta à aplicação de K foi elevada, resultando em aumentos duas a três vezes superiores aos teores foliares na ausência de adubação potássica. Os menores teores foliares ($3,3 \text{ g kg}^{-1}$) foram verificados com a aplicação de calcário acima de 500 mg dm^{-3} e ausência de adubação potássica. Quando as maiores doses de calcário foram aplicadas, as plantas exibiram uma deficiência severa de K, mesmo quando adubadas com 30 mg dm^{-3} de K.

A deficiência de K manifestou-se a partir do estágio V8 (Fehr & Caviness, 1977), anterior ao início do florescimento. Nessa época, as plantas iniciaram um processo de estiolamento em função da competição por luminosidade dentro da casa-de-vegetação. Isso determinou a diluição dos teores de todos os nutrientes, com consequências maiores para o teor de K naqueles tratamentos em que sua disponibilidade era menor.

Devido à alta mobilidade do K na planta, o aparecimento dos sintomas iniciam-se nas folhas fisiologicamente mais velhas. Os sintomas típicos principiam-se por uma clorose e um amarelecimento do ápice dos folíolos, que evolui pelos bordos e atinge toda a lâmina foliar, com posterior necrose dos tecidos, seguindo a evolução dos sintomas (Borkert et al., 1993b).

As plantas que exibiram inicialmente os sintomas de deficiência, estavam relacionadas aos tratamentos cuja disponibilidade do K no solo era baixa, principalmente com elevada relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ trocável (Tabela 10).

O teor foliar de K nas plantas com os primeiros sintomas de deficiência variou de $4,0$ a $4,4 \text{ g kg}^{-1}$, sem apresentar uma tendência de variação em função da dose de calcário aplicada. Os níveis de adubação potássica que não garantiram a nutrição adequada em K foram,

contudo, mais elevados com a calagem e, acompanhados de aumentos nos teores de K trocável dos solos.

Tabela 10 - Teores foliares e no solo relacionados aos tratamentos que apresentaram deficiência de K nas folhas, em função da aplicação de calcário e potássio.

Dose de Calcário	Dose de Potássio	Folha		Solo		
		K	$\frac{\text{Ca+Mg}}{\text{K}}$	K-trocável	$\frac{\text{Ca+Mg}}{\text{K}}$	$\text{pK} - \frac{1}{2} \text{p}(\text{Ca+Mg})$
-----mg dm ⁻³ -----		g kg ⁻¹		mmol _c dm ⁻³		
500	0	4,4	3,6	0,7	40	1,97
1000	15	4,0	4,3	1,2	36	1,92
1500	30	4,2	3,8	1,1	40	1,74
2000	30	4,2	4,0	1,4	44	1,81

média de 4 repetições.

Enquanto os solos que receberam 500 mg dm⁻³ de calcário apresentaram 0,7 mmol_c dm⁻³, considerado baixo, os solos que receberam quantidades de calcário acima de 1000 mg dm⁻³ apresentavam o K trocável próximo a 1,2 mmol_c dm⁻³, a partir do qual não se tem observado resposta à adubação potássica no Estado de São Paulo (Mascarenhas et al., 1992).

Além do teor de K foliar reduzido, a relação (Ca+Mg)/K nas folhas indicou um desbalanço catiônico na planta, resultado da absorção deficiente de K em relação ao Ca e ao Mg. Em condições ótimas de disponibilidade de K, a relação (Ca+Mg)/K nas folhas varia entre 1,4 e 1,07 (Mascarenhas et al., 2000). Na plantas deficientes os valores encontrados foram superiores a 3,6. Esses valores indicam a deficiência severa de K e concordam com os resultados obtidos por Mascarenhas et al. (1987), que encontraram o valor de 3,2 para a relação foliar em plantas deficientes.

O aumento das doses de calcário promoveu elevações dos teores de Ca e de Mg no solo, alterando não somente as suas disponibilidades para as plantas, mas também a disponibilidade do K. Assim, o aparecimento da deficiência de K que indicou a sua reduzida disponibilidade para as plantas não pôde ser avaliado somente pela determinação do K trocável do solo. No entanto, quando os teores de K, Ca e Mg foram avaliados conjuntamente, os valores tornaram-se mais indicativos da disponibilidade real de K para as plantas de soja.

A relação $(Ca+Mg)/K$ no solo, naqueles tratamentos onde apareceram inicialmente os sintomas de deficiência de K, variou de valores de 36 a 44, independente do nível de saturação por bases do solo. Sintomas de deficiência de K no campo também foram verificados em solos com relações superiores a 56, mas a deficiência severa, com valores da relação foliar equivalentes aos observados nesse estudo somente foram verificados quando a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo era superior a 100 (Mascarenhas et al., 1987).

Os valores do potencial de potássio relacionados com os sintomas de deficiência de K variaram entre 1,97 e 1,74 mas, são considerados adequados (Magdoff & Bartlett, 1980; Woodruff, 1955). No entanto, nos demais tratamentos sem sintomas visíveis nessa época, os teores foram sempre menores, indicando uma disponibilidade de K mais elevada na solução do solo. De qualquer forma, os sintomas de deficiência apresentaram melhor correlação com os teores trocáveis.

Nas folhas, as relações Ca/K , Mg/K e $(Ca+Mg)/K$, foram ampliadas pelo aumento das doses de calcário, enquanto que a relação Ca/Mg foi reduzida, em virtude da utilização de calcário dolomítico (Figura 09).

Figura 09 - Relações entre os teores foliares de K, Ca e Mg, no período do florescimento, em função das doses de calcário.

A relação Ca/K nas folhas aumentou de 1,0 para 2,3 e a relação Mg/K nas folhas de 0,3 para 0,9. A relação (Ca+Mg)/K nas folhas variou de 1,2 até 3,2, mostrando que os cátions divalentes do solo apresentam efeitos antagônicos sobre a absorção do K.

Com o aumento da disponibilidade do K nos solos, as relações Ca/K, Mg/K e (Ca+Mg)/K nas folhas foram reduzidas, atingindo os valores mínimos de 1, 0,3 e 1,3 respectivamente (Figura 10). O efeito do aumento do K no solo sobre a absorção de Ca e Mg foi mais acentuado que o efeito inverso desses cátions sobre a absorção do K. O efeito antagônico do K do solo é maior sobre o Mg do que sobre o Ca, determinando o aumento da relação Ca/Mg nas folhas de 2,7 para 3,4.

A relação $(Ca+Mg)/K$ nas folhas foi reduzida severamente de 3,9 para 2,1 quando foram aplicados 45 mg dm^{-3} de K. A partir desse valor a relação foi menos influenciada pela aplicação de K, reduzindo-se ao valor mínimo de 1,3 quando 90 mg dm^{-3} de K foram aplicadas. Essa faixa da relação foliar menos influenciada pela adubação potássica pode indicar a faixa adequada de K às plantas (Mascarenhas et al., 2000).

Figura 10 - Relações entre os teores foliares de K, Ca e Mg, no período do florescimento, em função das doses de K.

A relação $(Ca+Mg)/K$ nas folhas apresentou, ainda, interação significativa entre as doses de calcário e K aplicadas (Figura 11). Na ausência de calagem não houve variação significativa dos valores, apesar da tendência de queda. Nos demais níveis de calcário aplicados, a relação foi sempre reduzida pelo aumento nas doses de K, confirmando a competição por absorção.

Este efeito antagônico é, contudo, dependente das quantidades disponíveis no solo, não só do K, mas também do Ca e do Mg. Assim, as diferenças obtidas nas relações foliares em função das doses de calcário foram variáveis com o nível de K aplicado, sendo reduzidas pelo aumento da disponibilidade do K.

Comparando-se os valores da relação (Ca+Mg)/K nas folhas com o aparecimento dos sintomas de deficiências de K (Figura 11), verifica-se que o desbalanço entre esses nutrientes torna-se severo a partir dos valores mínimos de 3,6 nas folhas, concordando com Mascarenhas et al. (1987).

Figura 11 - Relação dos teores foliares de (Ca+Mg)/K, no período do florescimento, em função das doses de K e dos níveis de calcário.

A partir do estágio R5 (Fehr & Caviness, 1977), as plantas daqueles tratamentos que receberam até 60 mg dm^{-3} de K, independente da quantidade de calcário aplicada, passaram a apresentar os sintomas de deficiência de K nas folhas mais velhas. Essas folhas foram tornando-se cloróticas e adquirindo uma coloração marrom a partir dos bordos, que avançou para o centro dos folíolos, seguido do processo de necrose. Nesse período, a velocidade de absorção do K do solo ainda é elevada (Bataglia & Mascarenhas, 1977), mas inicia-se o enchimento dos grãos, aumentando a translocação de K das partes vegetativas para os órgãos reprodutivos.

O aparecimento dos sintomas nessas plantas está diretamente vinculado à redução do K trocável no solo, que atingiu, em média, $0,4 \text{ mmolc dm}^{-3}$ em todos os tratamentos ao final do ciclo, mas também, aos valores elevados da relação $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K}$ trocável nesse período (Tabelas 06 e 07).

As aplicações de calcário e potássio promoveram respostas positivas na produção de material vegetal seco dos órgãos da parte aérea das plantas de soja avaliadas no final do ciclo (Figura 12). As folhas foram os órgãos vegetativos que tiveram a maior resposta à aplicação de calcário. De forma quadrática a produção foi ampliada quatro vezes em relação à ausência de calcário. Também de maneira quadrática, a produção das hastes aumentou em 70%. A elevada resposta em produção de material vegetativo com o nível de calagem, confirma os efeitos benéficos da correção do pH do solo, principalmente para o sistema de cultivo em semeadura direta, pela necessidade de formação de palhada.

As vagens e os grãos apresentaram respostas lineares à calagem, atingindo produções equivalentes a 6,7 e 5,6 vezes as obtidas na ausência de calcário. O crescimento relativo da produção de grãos foi

muito elevado, já que outros resultados indicam efeito quadrático da calagem sobre a produção de grãos de cultivares precoces, resultando em aumentos médios de 40% (Mascarenhas et al., 1996). A calagem também altera as características qualitativas dos grãos, elevando o teor de proteína e reduzindo o teor de óleo (Tanaka et al., 1995).

Figura 12 - Produção de material vegetal seco das frações da parte aérea da soja, no final do ciclo, em função das doses de calcário.

A produção de material seco da parte aérea das plantas no final do ciclo foi elevada 3,4 vezes com a calagem, de forma quadrática, enquanto que as raízes tiveram um crescimento de 40% na produção de material seco. O crescimento do sistema radicular dependeu da melhoria do ambiente, como o aumento da disponibilidade de Ca e Mg e a elevação do pH e redução dos teores do Al tóxico. Esse crescimento foi acompanhado de um aumento na capacidade de exploração do solo pelo

sistema radicular, resultando em maior produção de material seco na parte aérea e, aumento na relação parte aérea/raiz (Figura 13).

Figura 13 - Produção de material vegetal seco da parte aérea e da raiz da soja, no final do ciclo, em função das doses de calcário.

No final do ciclo, folhas, hastes, vagens e grãos tiveram respostas positivas na produção de material vegetal devido ao K aplicado. Contudo, os aumentos relativos foram superiores nos órgãos reprodutivos (Figura 14). A produção de folhas e hastes aumentou 40 e 50%, enquanto que as produções de vagens e grãos aumentaram 120 e 160%.

A partir do florescimento, os solos que receberam as menores quantidades de K já poderiam apresentar a disponibilidade reduzida deste nutriente pois, de acordo com Bataglia & Mascarenhas (1977), 50 a 60% do material vegetal e do K já deveriam ter sido

acumulados até essa época. Dessa forma, em função das doses de K aplicadas, as diferenças no K disponível no solo seriam maiores na fase inicial do desenvolvimento reprodutivo.

Figura 14 - Produção de material vegetal seco das frações da parte aérea da soja, no final do ciclo, em função das doses de K.

O aumento da produção de grãos de soja com a adubação potássica foi verificado esporadicamente (Rosolem et al., 1984), mas difere da maioria dos resultados da literatura. Nestes, não foram observados aumentos de produção, mesmo naqueles solos que tiveram o teor de K trocável reduzido ao longo de cultivos sucessivos (Borkert et al., 1997a; Borkert et al., 1997b; Mascarenhas et al. 1981).

Contudo, a qualidade dos grãos produzidos tem sido influenciada pela adubação potássica. Além da melhoria na qualidade dos grãos, pela maior resistência das plantas à fitopatogênese, a

adubação potássica está diretamente relacionada ao aumento do teor de óleo e redução do teor de proteína nos grãos (Tanaka et al., 1995).

A produção de material seco pela parte aérea das plantas no final do ciclo foi aumentada em 70% com a adubação potássica. O crescimento das raízes foi menor, atingindo um aumento de produção de 20% na maior dose, determinando um aumento de 40% na relação de material seco da parte aérea/raiz (Figura 15).

Figura 15 - Produção de material vegetal seco da parte aérea e da raiz da soja, no final do ciclo, em função das doses de K.

Em geral, plantas de soja não apresentam aumentos no crescimento radicular em resposta à adubação potássica (Rossetto et al., 1995). Isso pode ser consequência da elevada eficiência da translocação do K absorvido para a parte aérea, resultando em maior produção de material vegetal pela parte aérea e, o consequente aumento da relação

de material seco acumulado pela parte aérea e pela raiz (Rossetto et al., 1995).

Ao final do ciclo, as quantidades de Ca, Mg e K acumuladas pela parte aérea das plantas foram influenciadas positivamente pela aplicação de calcário (Figura 16). Devido ao grande aumento das disponibilidades no solo do Ca e do Mg em relação ao K, durante o ciclo da soja, as plantas acumularam, na presença da maior dose de calcário, 4,5 e 6,4 vezes mais Ca e Mg, respectivamente. Como o aumento da produção de material vegetal pela parte aérea foi de 3,4 vezes, houve aumento da concentração de Ca e de Mg em todos os órgãos.

A concentração de K, no entanto, foi reduzida, uma vez que a acumulação pela parte aérea foi aumentada 80% em relação às plantas cultivadas na ausência de calagem. O aumento da quantidade acumulada de K foi resultado da elevada capacidade de absorção do K do solo pelas raízes das plantas do cultivar IAC - 17 (Fernandes et al., 1993). Em todos os tratamentos o K trocável foi reduzido a valores, em média, de $0,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 06). Porém, a disponibilidade relativa do K foi severamente reduzida com o aumento das doses de calcário.

Nas análises de terra anterior e posterior ao ciclo da soja, foram verificados a redução do K%/CTC de 3 a 2% para 0,7 a 0,5%. A relação (Ca+Mg)/K trocável aumentou de 13 a 42 para 33 a 150 (Tabela 06), de maneira que ao final do ciclo, somente naqueles solos que não receberam calagem a relação cátions trocáveis encontrava-se nos valores adequados (Mascarenhas et al., 1987; Rosolem et al., 1992), já que não somente o K, mas também o Ca e o Mg encontravam em valores reduzidos.

Figura 16 - Acumulação de nutrientes pela parte aérea da soja, no final do ciclo, em função das doses de calcário.

A acumulação de K pela parte aérea das plantas, ao final do ciclo, aumentou linearmente, apesar do maior ajuste ao modelo quadrático. As plantas que receberam a maior dose de K absorveram 2,7 vezes mais que as plantas não adubadas (Figura 17).

Conforme demonstrado pelos resultados obtidos durante o florescimento, o aproveitamento do K aplicado ocorreu sem um correspondente aumento de produção de material vegetal pela parte aérea das plantas. A tendência de acúmulo de K nos tecidos vegetativos quando o nutriente se torna mais disponível no solo (Rosolem et al., 1993; Rossetto et al., 1995), pode estar relacionada ao aumento no teor de K dos grãos (Borkert et al., 1997a) e, à elevada quantidade de K exportada pelos mesmos, em torno de 56% do total absorvido (Bataglia & Mascarenhas, 1977).

A acumulação de Ca foi elevada em 40% e a relação de extração Ca/K foi reduzida de 3,3 para 1,7 na maior dose de K aplicada. A acumulação de Mg, foi elevada 35% até a dose de 30 mg dm⁻³ de K. Contudo, nas doses superiores, o acúmulo foi reduzido até a equivalência nas quantidades de Mg acumuladas, na ausência e na maior dose de K aplicada (Figura 17). A relação de acumulação Mg/K foi reduzida de 1,4 a 0,5 na maior dose de K aplicada. O efeito antagônico da absorção de K sobre a de Mg é superior, portanto, ao mesmo efeito verificado sobre a absorção de Ca.

Figura 17 - Acumulação de nutrientes pela parte aérea da soja, no final do ciclo, em função das doses de K.

Entre os índices do solo que avaliaram a disponibilidade do K para as plantas de soja antes da semeadura, foram verificadas correlações significativas com o teor de K na folha diagnóstica, com a

produção de material vegetal da parte aérea e com a quantidade de K acumulada pela parte aérea, no florescimento (Tabela 11).

Tabela 11 - Coeficientes de correlação para os modelos matemáticos que relacionam os índices de nutrição potássica e de produção, avaliados no florescimento, com os índices de disponibilidade do K no solo, no período anterior à semeadura.

Índice de K do solo	Parte aérea		Folha diagnóstica
	Material seco	K acumulado	Teor de K
	g	mg	g kg ⁻¹
K trocável	$Y = a + b/x$ $r=0,23^{**}$	$Y = a + b/x$ $r=0,64^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,53^{**}$
K%/CTC	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,17ns$	$Y = a + b/x$ $r=0,61^{**}$	$Y = a + b/x$ $r=0,53^{**}$
<u>Ca + Mg</u> K	$Y = a + b/x$ $r=0,28^{**}$	$Y = a + bx$ $r=-0,47^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=-0,71^{**}$
a K	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,37^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,83^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,61^{**}$
<u>a K</u> $a(Ca+Mg)^{1/2}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,32^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,81^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=0,68^{**}$
pK - $1/2$ p(Ca+Mg)	$Y = a + bx + cx^2$ $R=-0,20ns$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=-0,78^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$ $R=-0,69^{**}$

** significativo a 1% pelo teste t.

ns não significativo pelo teste t.

O teor de K na folha diagnóstica foi limitado pela disponibilidade do K no solo relativa à presença de Ca e Mg. Os índices que apresentaram melhor correlação foram a relação (Ca+Mg)/K trocável e a relação das atividades dos cátions em solução, expressa em termos de atividades $[K/(Ca+Mg)^{1/2}]$ ou de potencial. A nutrição potássica da soja e, portanto, a resposta da cultura à aplicação desse nutriente, deve

considerar não só o teor de K no solo, mas também a sua relação com os teores de Ca e de Mg.

Os índices de avaliação da disponibilidade do K no solo também apresentaram correlações significativas com a produção de material vegetal da parte aérea e com a quantidade de K acumulada pela parte aérea no final do ciclo da soja (Tabela 12).

Tabela 12 - Coeficientes de correlação para os modelos matemáticos que relacionam os índices de nutrição potássica e de produção, avaliados no final do ciclo, com os índices da disponibilidade do K no solo, no período anterior à semeadura.

Índice de K do solo	Material seco		K extraído	
	g		mg	
K trocável	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,21ns$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,37^{**}$
K%/CTC	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,21^*$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,35^{**}$
$\frac{Ca+Mg}{K}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,47^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,26^{**}$
a K	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,32^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,61^{**}$
$\frac{a K}{a(Ca+Mg)^{1/2}}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,26^{**}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = 0,52^{**}$
$\frac{pK - 1/2}{p(Ca+Mg)}$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,22^*$	$Y = a + bx + cx^2$	$R = -0,51^{**}$

* e **, significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste t.

ns, não significativo pelo teste t.

A acumulação de K pela parte aérea das plantas, avaliada tanto no florescimento quanto no final do ciclo das plantas, apresentou melhor correlação com a atividade do K em solução e com a relação das atividades $[K/(Ca+Mg)^{1/2}]$. O acúmulo de K por uma cultura deve ser função das reservas disponíveis do elemento no solo, como o K trocável (Meurer & Anghinoni, 1993; Rosolem et al., 1988) e até mesmo o K não trocável (Rosolem et al., 1988). O resultado, contrário a essas

constatações, pode ter sido obtido somente por ter-se evitado a lixiviação do K, permanecendo assim, disponível para a absorção pelas plantas. De qualquer modo, os valores encontrados são pouco representativos.

A produção de material vegetal, avaliada no florescimento e no final do ciclo apresentou os menores coeficientes de correlação com a disponibilidade de K no solo. Em geral, não foram observadas correlações elevadas entre a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo e a produção de material seco (Rosolem et al., 1992; Usherwood, 1982). Os índices que apresentaram as melhores correlações foram a atividade do K em solução e a relação dos teores trocáveis, nas respectivas épocas, evidenciando a necessidade do equilíbrio dos cátions do solo para o bom desenvolvimento das plantas.

Apesar das baixas correlações entre os índices de disponibilidade de K no solo e a produção de material seco pela soja, foi possível identificar que as maiores produções ocorreram quando os teores de K trocável do solo foram superiores a $1,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável variou entre 18 e 30 (Tabela 13).

Nessas condições, a aplicação de K promoveu aumentos dos teores de K trocável no solo e da disponibilidade do K relativa ao Ca e ao Mg, resultando em aumento na concentração de K nos tecidos foliares. No entanto, as produções de material seco pela parte aérea das plantas, avaliadas nos estádios R2 e R8 (Fehr & Caviness, 1977), não foram alteradas significativamente.

Portanto, desde que a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo mantenha-se dentro da faixa adequada, as aplicações de K em torno de 30 a 45 mg dm^{-3} devem ser suficientes para a obtenção dos maiores crescimentos vegetativos. A redução dessa relação dos cátions disponíveis no solo promovida pela aplicação de K em quantidades

maiores altera o balanço nutricional, porém, não reflete em prejuízos para o crescimento vegetativo.

Tabela 13 - Produção de material seco em dois estádios do desenvolvimento da soja, teores de K e relações dos cátions trocáveis no solo e na folha diagnóstica de soja em função da aplicação de K.

Dose de Potássio	Solo		Folha					Material Seco ¹	
	K	Ca+Mg	K	Ca	Ca+Mg	Ca	Mg	Estádio ²	
		K		Mg	K	K	K	R 2	R 8
mg dm ⁻³	mmol _e dm ⁻³		g kg ⁻¹					-----g-----	
0	0,8c	48a	5,0e	2,7c	3,9a	2,8a	1,1a	23,0c	18,7c
15	1,1c	37b	4,9e	2,7c	3,5a	2,5a	1,0a	26,2bc	22,7bc
30	1,4bc	30c	5,7de	2,8bc	2,9b	2,1b	0,8b	29,5ab	27,5a
45	2,0ab	23cd	6,8cd	3,2ab	2,2c	1,7c	0,6c	29,2ab	27,1ab
60	2,4a	20d	7,6bc	3,2ab	1,9cd	1,4cd	0,5cd	32,1a	26,9ab
75	2,2a	20d	8,3b	3,3a	1,7de	1,3de	0,4de	31,3a	28,5a
90	2,4a	18d	10,1a	3,4a	1,3e	1,0e	0,3e	32,3a	27,4ab
D.M.S.	0,64	7,15	1,25	0,38	0,51	0,38	0,16	4,45	4,69
C.V. (%)	38,3	26,9	19,0	13,1	21,8	22,1	25,1	16,1	19,3

¹ folhas + hastes.

² Fehr & Caviness (1977).

Letras distintas na vertical diferem a 5% pelo teste Tukey.

Média de 20 repetições.

Contudo, quando a relação (Ca+Mg)/K trocável é elevada, o desbalanço nutricional gerado pela maior competição exercida pelo Ca e o Mg sobre a absorção de K pelas raízes das plantas resulta em deficiência potássica e redução do crescimento.

Dentro dos limites da relação (Ca+Mg)/K trocável no solo que resultaram as maiores produções, verificou-se que a relação (Ca+Mg)/K nas folhas esteve sempre abaixo de 3,0. Valores de 3,2 ou

superiores para a relação dos teores dos cátions nas folhas indicam o completo desbalanço nutricional, verificando-se deficiência severa de K nas folhas de soja (Mascarenhas et al., 1987).

Quando os valores da relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo estavam elevados, a aplicação de K resultou em reduções pronunciadas da relação desses cátions nas folhas. A partir das quantidades de K aplicadas que estabeleceram uma relação $(Ca+Mg)/K$ trocável dentro da faixa adequada e resultaram nas maiores produções de material seco, a relação $(Ca+Mg)/K$ nas folhas foi menos influenciada e a relação Ca/Mg nas folhas apresentou tendência de estabilização.

Essa redução nas variações das relações dos teores foliares pode indicar a faixa adequada de K às plantas (Mascarenhas et al., 2000) mas, também indica que o equilíbrio nutricional entre os teores foliares de Ca, Mg e K está diretamente relacionado com a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo.

A nutrição potássica das plantas de soja, avaliada pela produção de material seco, pela concentração de K na folha diagnóstica e pela acumulação de K pela parte aérea mostra-se, portanto, significativamente influenciada pelas alterações nas propriedades químicas do solo promovidas pelas práticas de calagem e adubação potássica.

Não somente os teores trocáveis ou as atividades em solução de K, Ca e Mg são influenciados, mas também ocorre uma importante alteração no equilíbrio existente entre esses cátions que, de modo complementar, indica a disponibilidade verdadeira de K para as plantas. Desse modo, os índices de avaliação do K do solo que consideram o efeito competitivo dos cátions constituem, de fato, informações mais completas sobre o estado de disponibilidade do K no solo.

Tanto os índices de avaliação dos cátions trocáveis quanto os índices das atividades em solução mostraram-se superiores ao valor K trocável para esta avaliação de disponibilidade. Contudo, questões de ordem prática e econômica estão envolvidas com os métodos de avaliação e recomendação de adubação.

Dos índices avaliados, a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo constitui uma informação importante de avaliação do K no solo, que poderia ser incorporada aos resultados das análises de terra para fins de recomendação de adubação potássica para a cultura da soja, sem alteração da metodologia de amostragem de terra e sem onerar o custo da análise química.

5 CONCLUSÕES

Da análise dos resultados e, dentro dos limites testados, pode-se concluir que:

Os índices de disponibilidade de K no solo relativos aos teores de Ca e de Mg, tanto do complexo de troca quanto da solução do solo, estão direta e altamente correlacionados com a nutrição potássica da soja.

A relação $(Ca+Mg)/K$ trocável no solo constitui um índice importante de avaliação da disponibilidade do K no solo, que poderia ser incorporado aos resultados das análises de terra para fins de recomendação de adubação potássica para a cultura da soja.

A recomendação de adubação potássica para a cultura da soja deve considerar a quantidade de calcário aplicada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. Soil solutions. In: CARSON, E.W., ed. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. Cap.19, p.1-85.

ALVARENGA, M.I.N.; LOPES, A.S. Influência da adubação potássica no equilíbrio de cátions em Latossolo Roxo Distrófico, fase Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.4, p.347-355, abr. 1988.

BARBER, S.A.; HUMBERT, R.P. Advances in knowledge of potassium relationship in the soil and plant. In: McVICKAR, M.H.; BRIDGER, G.L.; NELSON, L.B. **Fertilizer technology and uses**. Madison: SSSA, 1963. cap.11, p.231-268.

BATAGLIA, O.C.; MASCARENHAS, H.A.A. **Absorção de nutrientes pela soja**. Campinas: Instituto Agronômico, 1977. 36p. (Boletim Técnico, 41).

BEAR, F.E.; TOTH, S.J. Influence of calcium on availability of other soil cations. **Soil Science**, v.65, n.1, p.69-74, jan/jun. 1948.

- 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, n.11, p.1119-1129, nov. 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 Eutrófico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.10, p.1009-1022, out. 1997b.
- BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J.; SILVA, D.N.da. Calibração de potássio trocável para soja em Latossolo Roxo Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.223-226, 1993a.
- BORKERT, C.M.; SILVA, D.N.da; SFREDO, G.J. Calibração de potássio nas folhas de soja em Latossolo Roxo Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.227-230, 1993b.
- BOYUCOS, G.J. The hydrometer method improved for the chemical analysis of soil. **Soil Science**, v.23, p.343-53, 1927.
- CARMELLO, Q.A.C. Saturação por bases e relações entre K, Ca e Mg do solo na nutrição potássica do milho (*Zea mays* L.) cv. Piranão. Piracicaba, 1989. 106p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- CATANI, R.A.; GALLO, J.R. Avaliação da exigência de calcário dos solos de São Paulo mediante a correlação entre o pH e a saturação em bases. **Revista de Agricultura**, v.30, p.49-60, 1955.

COSTA, M.P.da. Efeito da matéria orgânica em alguns atributos do solo. Piracicaba, 1983. 137p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ELKHATIB, E.A.; HERN, J.L.; STALEY, T.E. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, n.3, p.578-583, 1987.

EMBRAPA - SOLOS. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 1999. xvi. 412p.

FASSBENDER, H.W. Equilibrio cationicos y disponibilidad de potásio en suelos de América Central. **Turrialba**, v.22, n.4, p.388-397, 1972.

FEHR, W.A.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 11p. (Iowa Agriculture Experimental Station Bulletin, 80)

FERNANDES, D.M.; ROSSETO, 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, p.405-410, 1993.

GARGANTINI, H.; COELHO, F.A.S; SOARES, F.V.E. **Levantamento de fertilidade dos solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1970. 32p.

GILLMAN, G.P.; BELL, L.C. Soil solution studies on weathered soils from tropical North Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, v.16, n.1, p.67-77, 1978.

GOEDERT, W. J.; COREY, R.B.; SYERS, J.K. The effects on potassium equilibria in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science**, v.120, p.107-11, 1975.

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis advanced course**. Madison: University of Wisconsin, Department of Soils, 1956.

MAGDOFF, F.R.; BARTLETT, R.J. Effect of liming acid soils on potassium availability. **Soil Science**, v.29, n.1, p.12-14, jan.1980.

MASCARENHAS, H.A.A.; BRAGA, N.R.; MIRANDA, M.A.C. de; TISSELI FILHO, O.; MIYASAKA, S. Calagem e adubação da soja. In: **A soja no Brasil Central**. Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.137-211.

MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; MIRANDA, M.A.C; BRAGA, N.R.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. **O Agrônomo**, v.40, n.1, p.34-43, 1988.

MASCARENHAS, H.A.A.; MIRANDA, M.A.C; LELIS, L.G.L.; BULISANI, E.A.; BRAGA, N.R.; PEREIRA, J.C.V.N.A. **Haste verde e retenção foliar em soja causada por deficiência de potássio**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 15 p. (Boletim Técnico IAC, 199).

MASCARENHAS, H.A.A.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; GALLO, P.B.; BATAGLIA, O.C. Efeito de adubos potássicos na produção de soja. **Scientia Agricola**, v.51, n.1, p.82-89, jan/abr. 1994.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; CARMELLO, Q.A.C.; GALLO, P.B.; AMBROSANO, G.M.B. Calagem e potássio na cultura da soja. **Scientia Agricola**, v.57, 2000. (No prelo).

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; GALLO, P.B.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; AMBROSANO, G.M.B.; CARMELLO, Q.A.C. Efeito da calagem sobre a produtividade de grãos, óleo e proteína em cultivares precoces de soja. **Scientia Agricola**, v.53, n.1, p.164-171, jan/abr. 1996.

MASCARENHAS, H.A.A.; VALADARES, J.M.A.; ROTTA, C.L.; BULISANI, E.A. Adubação potássica na produção de soja, nos teores de potássio em Latossolo Roxo Distrófico de cerrado. **Bragantia**, v.40, p.125-34, 1981.

McLEAN, E.O. **Interpretação de análise de solo**. Campinas: Fundação Cargill, 1984. 40p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Potassium. In: MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4 ed. Berna: International Potash Institute, 1987. cap.10, p.427-54.

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.; ROSSO, J.I. Cinética de liberação de potássio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.4, p.553-558, 1997.

MIRANDA, M.A.C.de; BULISANI, E.A.; MASCARENHAS, H.A.A.; FALIVENE, S.M.P. Clorose internerval em folhas de soja induzida por deficiência de magnésio. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3, Campinas, 1984. **Anais**. Londrina: CNPSo/EMBRAPA, 1984. p.703-708.

OHLROGGE, A.J.; KAMPRATH, E.J. Fertilizer use in soybeans. In: DINAUER, R.C. ed. **Changing patterns in fertilizer use**. Madison: SSSA, 1968. p.273-295.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (eds.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1996. (Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van; MASCARENHAS, H.A.A. Calibração de potássio e fósforo em solos para soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15, Campinas, 1975. **Anais**. Campinas: SBCS, 1976. p.309-315.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 31p. (Boletim Técnico IAC, 81).

- 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, n.9, p.1045-1054, set. 1993.
- ROSOLEM, C.A.; MACHADO, J.R.; MAIA, L.C.; NAKAGAWA, J. Respostas de soja ao magnésio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.47-54, 1992.
- 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, n.1, p.121-125, 1988.
- ROSOLEM, C.A.; NAKAGAWA, J. Potassium uptake by soybean as affected by exchangeable potassium in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.16, p.707-726, 1985.
- ROSOLEM, C.A.; NAKAGAWA, J.; MACHADO, J.R. Adubação potássica da soja em Latossolo vermelho escuro fase arenosa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.11, p.1319-26, 1984.
- ROSSETO, C.A.V.; FERNANDES, D.M.; ISHIMURA, I.; ROSOLEM, C.A. Diferentes respostas de cultivares de soja ao potássio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.10, p.1225-1231, out. 1995.
- SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: Depto. Química, ESALQ/USP, 1974. 56p.
- SAS INSTITUTE INC. **The SAS-system for windows**: release 6.11 (software). Cary: SAS Institute, 1996.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 6a ed. Washington, D.C.: AID/USDA/SMSS,1994. 306p. (Soil Management Support Services Technical Monograph, 19).

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A. **Soja, nutrição, correção do solo e adubação**. Campinas: Fundação Cargill, 1992. 60p. (Série técnica, 7)

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B.; GALLO, P.B. Concentração e produtividade de óleo e proteína de soja em função da adubação potássica e da calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.4, p.463-469, abr.1995.

USHERWOOD, N.R. Interação do potássio com outros íons. In: SIMPÓSIO SOBRE O POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **O potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI, O.; USHERWOOD, N.R.(eds.). POTAFOS, 1982. p.227-47.

WOLT, J.D. Chemical statics and dynamics applied to soil solution. In: WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York: John Wiley & Sons, 1994. cap.3, p.22-73.

WOODRUFF, C.M. The energies of replacement of calcium by potassium in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.19, n.1, p.167-171, 1955.

YAMADA, T; BORKERT, C.M. Nutrição e produtividade da soja. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1, Piracicaba, 1992. **Anais**. Piracicaba: CÂMARA, G.M. de S.; MARCOS FILHO, J.; OLIVEIRA, E.A.M. de (eds.). Depto Agricultura, ESALQ/USP; FEALQ, 1992. p.180-212.