5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO POTÁSSIO NO SOLO

Gilmar Ribeiro Nachtigall[1]
Bernardo van Raij[2]

ABSTRACT

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF POTASSIUM IN THE SOIL

The high potassium (K) demand by cultures contrasts with the concentrations, in general insufficient, that occur in Brazilian soils, a fact that has been leading to a great increase in K fertilizers consumption, accompanying the astounding growth of the Brazilian agricultural production in the past few years. The diversity of soil situations, crops and fertilizing managements make it necessary to diagnose the K in the soil, in each case, as one of the prerequisites for the prescription of fertilizers, which needs to be adapted according to the region and the culture. The total concentration of K in the soil is distributed in a wide range of retention force, varying continually, from the portions of the element closely linked to the structure of the primary minerals hardly weathered to the freest portions that are water soluble. The forms of K linked to the solid phase of the soil are balanced with the K concentrations in the solution. However, the speed in which each

[1] Pesquisador da Área de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Uva e Vinho, Caixa Postal 130, CEP 95700-000, Bento Gonçalves-RS; e-mail: gilmar@cnpuv.embrapa.br
[2] Pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Campinas-SP; e-mail: bvanraij@terra.com.br

form is liberated varies according to the type of reaction involved. The scientific literature registers a great deal of methods to analyze K in soils, in general aiming to determine specific forms of the element. The available K forms in the soil are identified, in general, by exchangeable K extracted with ammonium acetate at pH 7,0, which can also be estimated by other extractors such as Mehlich and ion-exchange resin, and by non-exchangeable K extracted by boiling sulfuric acid or nitric acid. It is considered that non-exchangeable K represents the reserves in the medium term and exchangeable K, the readily available form. Research results obtained over the years indicate that there is satisfactory amount of information to establish availability limits in soils only for exchangeable K. However, the methods used to evaluate exchangeable K in the soil on a routine basis do not always quantify real availability of this nutrient in the soil. Thus, scientists should search for the inclusion of other variables to interpret the analyses of K in the soil, because for some areas and types of soil this can increase the diagnosis efficiency. On the other hand, the knowledge on the reserves of K in the soil (non-exchangeable forms) deserves more attention.

RESUMO

As elevadas exigências de potássio (K) pelas culturas contrastam com os teores, em geral, insuficientes que ocorrem nos solos brasileiros, o que tem levado a grande aumento do consumo de fertilizantes potássicos acompanhando o vertiginoso crescimento da produção agrícola brasileira nos últimos anos. A diversidade de situações de solos, culturas e hábitos de adubação torna necessária a diagnose do K existente no solo, em cada caso, como um dos pré-requisitos para a prescrição da adubação, que necessita ser adaptada regionalmente e por cultura. O teor total de K do solo é distribuído em uma ampla faixa de força de retenção, a qual varia de forma contínua, desde as porções do elemento mais intimamente ligadas à estrutura dos minerais primários de mais difícil intemperismo até as porções mais livres que são solúveis em água. As formas de K ligadas à fase sólida do solo estão em equilíbrio com os teores de K na solução. Entretanto, a velocidade com que cada forma é liberada varia em função do tipo de reação envolvida. A literatura científica registra grande diversidade de métodos de análise deste nutriente em solos, em geral com o objetivo de determinar formas específicas do elemento. As formas deste nutriente disponíveis no solo são identificadas, de modo geral, pelo K trocável extraído com acetato de amônio a pH 7,0, as quais também podem ser estimadas por outros extratores, como o Mehlich e a resina de troca iônica, e o K não-trocável extraído por ácido sulfúrico ou ácido nítrico fervente. Considera-se que o K não-trocável representa a reserva de médio prazo e o K trocável, a forma prontamente disponível. Os resultados de pesquisas obtidos ao longo dos anos indicam que existem informações em quantidades satisfatórias para estabelecer limites de disponibilidade nos solos apenas para K trocável. Contudo, os métodos utilizados para a avaliação do K trocável no solo de forma rotineira nem sempre quantificam a real disponibilidade deste nutriente no solo. Deste modo, deve-se buscar a inclusão de outras variáveis para interpretar as análises de K do solo, pois para algumas regiões e tipos de solo isto pode aumentar a eficiência do diagnóstico. Por outro lado, o conhecimento sobre as reservas de K do solo (formas não-trocáveis) merece maior atenção.

1. INTRODUÇÃO

Entre os macronutrientes, depois no nitrogênio (N), o potássio (K) é o segundo elemento exigido em maiores quantidades pela maioria das plantas cultivadas. Sua importância aumenta à medida que a agricultura torna-se mais intensiva e tecnificada, situação em que os maiores rendimentos obtidos aumentam as exigências de nutrientes pelas culturas.

Para a obtenção de altos rendimentos agrícolas e produtos de boa qualidade, são exigidas quantidades suficientes e balanceadas de nutrientes. As elevadas exigências de K pelas culturas contrastam com os teores em geral insuficientes deste nutriente que ocorrem nos solos brasileiros, o que tem levado a grande aumento do consumo de fertilizantes potássicos acompanhando o vertiginoso crescimento da produção agrícola brasileira nos últimos anos.

A diversidade de situações de solos, culturas e hábitos de adubação torna necessária a diagnose do K existente no solo, em cada caso, como um dos pré-requisitos para a prescrição da adubação, que necessita ser adaptada regionalmente e por cultura.

A análise de solo é discutida a seguir, enfocando o K no solo, a sua determinação e como os resultados têm sido interpretados.

2. POTÁSSIO NO SOLO

De acordo com Schroeder (1979), o teor médio de K na crosta terrestre é de 2,6%, constituindo o sétimo elemento químico em ordem decrescente de abundância, sendo superado apenas por oxigênio (O), silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca) e sódio (Na). No solo, segundo o mesmo autor, os teores de K variam entre menos do que 0,1% e mais do que 3,0%, com valores mais freqüentes ao redor de 1,0%.

A revisão realizada por Lopes (1982), com resultados de vários autores que avaliaram os teores de K nos solos do Brasil, mostrou que os teores de K total nesses solos variaram de 0,05% a 2,5%. Considerando que todo o K presente no solo é oriundo do material de origem, as diferenças nos teores do elemento entre solos são resultantes das variações dos fatores e dos processos pedogenéticos que contribuem para a formação de cada solo, ocorrendo teores maiores deste nutriente em solos menos intemperizados. No Brasil, estes solos estão localizados mais ao sul, em maiores altitudes e também na região semi-árida.

O K total do solo é comumente classificado de várias formas. Tisdale e Nelson (1975) o classificaram, seguindo um critério de disponibilidade do nutriente para as plantas, em: relativamente indisponível, lentamente disponível e prontamente disponível. Ritchey (1982), seguindo critério químico, o classificou como: ocorrendo na forma de componente estrutural de minerais primários, como micas e feldspatos potássicos; temporariamente fixado entre as camadas de argila 2:1; trocável, facilmente extraível por sal neutro, como acetato de amônio; presente na solução do solo. Seguindo critério semelhante ao deste último autor, Goedert (1973) o classificou em estrutural, trocável em diferentes formas e da solução.

A adoção de uma ou outra dessas classificações é dificultada por pelo menos duas razões: nem todas as formas citadas são passíveis de caracterização quantitativa em laboratório com a precisão desejada; e, a rigor, nenhuma das formas constitui quantidade discreta, pois não há limites nítidos entre as formas, como pode ser depreendido da discussão a seguir.

O K estrutural é definido com a fração do elemento contida na estrutura cristalina de minerais primários (principalmente) e secundários. Os minerais primários que contêm K em maior abundância são os feldspatos potássicos (ortoclásio e microclinas) e as micas (biotita e muscovita) (DIEST, 1979). Segundo Schroeder (1979), os feldspatos potássicos e as micas apresentam teores de K ao redor de 14% e 10%, respectivamente. Entre os minerais secundários destacam-se as argilas 2:1 ilita, vermiculita e montmorilonita, pois possuem teores de K_2O variando de 4% a 7%, 0 a 2% e 0 a 0,5%, respectivamente. Cabe ressaltar que quanto mais intemperizados forem os solos, menos abundantes são esses minerais.

O K trocável é a fração deste nutriente no solo mais analisada. Como qualquer cátion trocável, é a porção do elemento que ocorre adsorvida às cargas elétricas negativas dos colóides minerais e orgânicos do solo. As diferentes formas de K trocável citadas por Goedert (1973) referem-se ao K^+ adsorvido a sítios de troca das argilas com diferentes graus de seletividade para este cátion. Nas argilas 2:1, segundo Mengel e Kirkby (2001), ocorrem três tipos de sítios de adsorção de cátions (Figura 1): os sítios internos "i", que exibem alta seletividade para o íon K em relação a outros cátions; os sítios externos "e", que também possuem seletividade para o íon K, mas em menor grau do que os sítios internos "i"; e os sítios planares "p", que não apresentam seletividade para K. Nas argilas 1:1 e na matéria orgânica todos os sítios de adsorção são, em termos funcionais, semelhantes aos sítios "p" das argilas 2:1 (MENGEL e KIRKBY, 2001), ou seja, não apresentam seletividade para K^+ em relação a outros cátions. Entretanto, os sítios de adsorção "p", "e" e "i" não são perfeitamente distinguíveis entre si em função da seletividade para K^+. Gouling e Talibudeen (1980 citados por QUÉMÉNER, 1986) estudaram a questão da seletividade por métodos termodinâmicos e concluíram que alguns minerais têm mais do que os três tipos de sítios de adsorção citados ("p", "e" e "i"). Estendendo essas conclusões, pode-se pressupor que entre os sítios "p" e "i" existe uma infinidade de sítios além dos "e" cuja seletividade para K^+ cresce continuamente desde as posições "p" até as "i".

Por outro lado, as partículas minerais presentes no solo não são homogêneas, apresentando-se com partes intemperizadas em vários estados de decomposição, juntamente com partes na forma original do mineral primário. Por exemplo, ao liberar K uma mica é transformada em outro mineral, como ilita ou vermiculita, que são minerais secundários (SCHROEDER, 1979). Esses, por sua vez, ao adsorverem K nos sítios "i", adquirem características do mineral primário original (DIEST, 1979). Tais transformações podem ocorrer parcialmente em uma partícula e, conse-

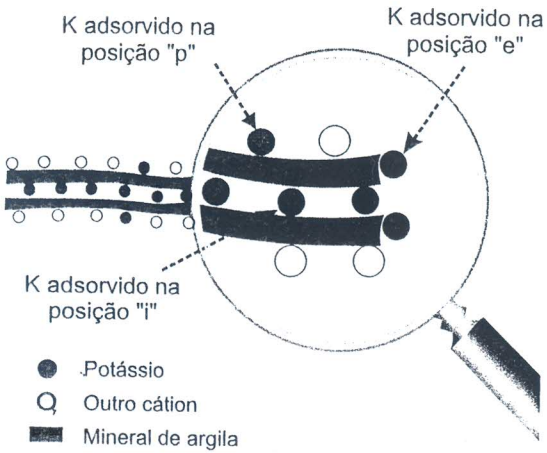

Figura 1. Posição dos sítios de troca (adsorção) de potássio em argilo-minerais do tipo 2:1.
Fonte: Adaptada de MENGEL e KIRKBY (2001).

qüentemente, em uma mesma partícula podem ocorrer várias porções de características completamente diferentes.

Logo, pode ser concluído que o teor total de K do solo é distribuído em ampla faixa de força de retenção, a qual varia de forma contínua, desde as porções do elemento mais intimamente ligadas à estrutura dos minerais primários de mais difícil intemperismo até as porções mais livres, solúveis em água. Entre estes extremos encontra-se o K adsorvido em vários níveis de seletividade pelos diferentes sítios de adsorção deste elemento dos minerais de argila.

3. DINÂMICA DO POTÁSSIO NO SOLO

As formas de K ligadas à fase sólida do solo estão em equilíbrio com os teores deste nutriente na solução (Figura 2). Quando este nutriente é retirado da solução pela absorção por uma raiz, por exemplo, o equilíbrio é rompido e uma fração dele ligada à fase sólida é liberada para manter o equilíbrio. Se todas as formas de K estão ligadas a este equilíbrio, todas podem ser liberadas para a solução. Entretanto, a velocidade com que cada forma é liberada varia em função do tipo de reação envolvida.

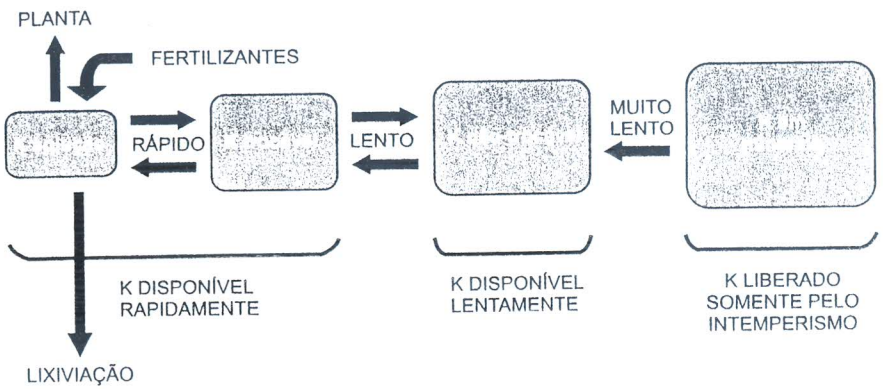

Figura 2. Representação esquemática da dinâmica do potássio no solo.
Fonte: Adaptada de MIELNICZUK (1982).

O K trocável é liberado rapidamente porque envolve simplesmente reações de troca na superfície dos colóides. Aquele não-trocável é liberado com maior dificuldade, porque são envolvidas, além das reações de troca, a expansão das argilas e a difusão do elemento de posições entre as camadas estruturais da argila até a superfície externa (REICHENBACH, 1972). A liberação do K estrutural envolve mecanismos de dissolução dos minerais primários, variável de acordo com o tipo de mineral. Os minerais de estrutura laminar comportam-se de forma semelhante às argilas 2:1, como é o caso das micas, enquanto os minerais de estrutura não-laminar, como os feldspatos, obedecem aos princípios da solubilidade de substâncias sólidas (SCHROEDER, 1979).

É graças a este equilíbrio entre as formas de K no solo que a concentração deste elemento na solução do solo tende a ser mantida quando as raízes de uma planta estão absorvendo o nutriente do solo. A capacidade de um solo em manter uma dada concentração de K^+ na solução quando este é absorvido pelas plantas constitui o fator capacidade (DIEST, 1979), mais comumente denominado "poder tampão de K" (PTK).

O PTK é definido pela relação entre a quantidade de K que está em imediato equilíbrio com a solução e a concentração deste nutriente na solução do solo (MIELNICZUK, 1982). Em condições normais, a forma que está em imediato equilíbrio com a solução é o K trocável. Quando a

concentração deste elemento na solução atinge valores mais baixos, começa a ser liberado K não-trocável. Como esta última forma é liberada com maior lentidão, porque envolve reações menos espontâneas do que aquelas com o K trocável, o suprimento deste nutriente para a solução, embora constante, é muito lento para nutrir adequadamente uma planta em rápido crescimento (MIELNICZUK e SELBACH, 1978). A liberação do K estrutural, embora ocorra, é ainda mais lenta do que a liberação daquele não-trocável. Em função disso é que o K trocável e aquele da solução são considerados, segundo a classificação de Tisdale e Nelson (1975), prontamente disponíveis, enquanto o K não-trocável e o estrutural são considerados lentamente disponível e indisponível, respectivamente. Metson (1968), Grimme e Németh (1979) e Mielniczuk (1982) consideram o K não-trocável uma forma disponível a médio prazo, o que deve significar, em termos práticos, o mesmo que lentamente disponível.

O K que está em imediato equilíbrio com aquele da solução do solo é denominado fator "quantidade" (SCHROEDER, 1975), porque é esta fração do K do solo que determina a quantidade do nutriente que pode ser liberada para as raízes, via solução, durante o período em que a planta o está absorvendo. O K na solução do solo é denominado fator "intensidade" (SCHROEDER, 1975), porque determina a taxa (velocidade) de absorção do elemento pela planta em um dado momento, embora represente uma porção quantitativamente muito pequena do K disponível.

4. ANÁLISE DO POTÁSSIO DO SOLO

A literatura científica registra uma grande diversidade de métodos de análise de K em solos, em geral com o objetivo de determinar formas específicas do elemento. Essa diversidade, em vez de ajudar, tem dificultado comparações, principalmente entre regiões de solos diferentes. Além disso, muitos extratores usados nas análises de solo de rotina são multinutrientes, em geral desenvolvidos para outros nutrientes, sendo usados para K aproveitando a facilidade de extração do teor trocável com inúmeras soluções.

Pode-se ter uma idéia da diversidade de métodos existentes para K pela lista compilada por Goulding (1987) a partir de trabalhos de diversos autores (Quadro 1).

Quadro 1. Métodos utilizados para avaliar a concentração de potássio no solo.

Frações de potássio no solo	Método
Solução	• Sistema de equilíbrio ou coluna de lixiviação com água • Extração por membranas ou centrifugação (que extrai o potássio na solução do solo) • Quocientes de atividade
Trocável	• Sistema de equilíbrio ou lixiviação com soluções diluídas ou sais (especialmente NH_4^+) e ácidos (cítrico e nítrico) • Eletro-ultrafiltração • Mehlich 1 ($HCl + H_2SO_4$) e Mehlich 2 (ácido acético, fluoreto de amônio, cloreto de amônio e HCl) • Bicarbonato de amônio + DTPA • Bray 1 • Isotermas de troca • Acetato-lactato de cálcio (CAL-K) • Resina trocadora de íons
Não-trocável	• Lixiviação com ácidos diluídos e sais • Aquecimento com ácidos diluídos • Aquecimento com ácidos concentrados • Extrações sucessivas com NaTPB • Extrações sucessivas com ácido oxálico • Extração a quente com $MgCl_2$ • Eletro-ultrafiltração • Eletrodiálise
Mineral	• Dissolução seletiva pela fusão com Na-pirosulfato
Total	• Digestão com HF
Multifração	• Eletro-ultrafiltração • Extração seqüencial por resina • HNO_3 fervente

Fonte: GOULDING (1987).

Desses métodos, alguns são considerados padrões para definir as diferentes formas de K no solo. A solução de acetato de amônio (NH_4O-Ac) 1 mol L^{-1} a pH 7,0 é referência para a extração de K e de outros cátions

trocáveis. Este método é o mais amplamente recomendado na bibliografia que trata de métodos de análises de solos, como é o caso de Pratt (1965a), Hesse (1972) e Helmke e Sparks (1996). Segundo Pratt (1965b), o K trocável é, por definição, aquele liberado pela troca com cátions de soluções salinas adicionadas ao solo. Porém, considerando-se que a quantidade de K extraído depende da natureza da solução extratora, a fração trocável do elemento é definida mais especificamente quando extraída pelo acetato de amônio a pH 7,0.

Contudo, o K trocável pode ser extraído facilmente com uma série de soluções, como as indicadas no Quadro 1, sendo os resultados, em geral, pouco afetados pelo tipo de extrator, ao contrário do que acontece, por exemplo, para o fósforo (P). No caso de extratores ácidos, o mecanismo não é só a troca iônica, pois o íon H^+ do ácido é adsorvido pelo solo, bloqueando uma carga negativa, o que se deve ao caráter de ácido fraco das posições de troca iônica do solo, liberando o cátion para a solução do solo. Isso explica o sucesso, no passado, das soluções de concentração relativamente baixa, como HCl 0,1 mol L^{-1} e HNO_3 0,05 mol L^{-1}, para a extração de cátions trocáveis do solo.

O K adsorvido nas posições "i", juntamente com uma parte daquele contido em minerais primários de mais fácil intemperismo, pode ser extraído com solução de HNO_3 1 mol L^{-1} fervente, de acordo com Mielniczuk e Selbach (1978). Segundo esses autores, o HNO_3 fervente extrai, além desta fração, também o K trocável. Assim, a diferença entre o K extraível por HNO_3 1 mol L^{-1} fervente e o K trocável, extraído por acetato de amônio a pH 7,0, é denominada K não-trocável. Considerando-se que o HNO_3 fervente extrai uma parte do K estrutural mais facilmente liberada e que, portanto, todo o K que o HNO_3 fervente não consegue solubilizar deve ser constituinte da estrutura de partículas minerais mais resistentes, a diferença entre o K total e o K extraído pelo HNO_3 fervente pode ser conceituada como K estrutural. O K solução é a porção do elemento encontrada na solução do solo obtida por deslocamento em uma coluna de solo com teor de umidade normalmente na capacidade de campo (ADAMS, 1974) ou por extração com soluções diluídas de $CaCl_2$ ou $SrCl_2$ (MIELNICZUK, 1982). Essa última fração do K determina mais o que se chama de fator intensidade de K no solo, já que as quantidades de K trocável removidas do solo são pequenas.

A resina de troca iônica é um método sensível aos processos que controlam a disponibilidade dos nutrientes na superfície das raízes, de modo que permite obter um diagnóstico mais preciso dessa disponibilidade. O uso da resina permite que os resultados das análises químicas representem as características do solo que regulam o processo de difusão de K no solo e estimem a concentração deste nutriente na solução do solo, o que se relaciona diretamente com o fluxo de massa de K até as raízes. Por essas razões, a resina proporciona uma forma mais precisa para separar diferentes solos de acordo com sua capacidade de liberar K para a planta (SKOGLEY, 1994). Os resultados da extração com resina de amostras de solo de diferentes partes do mundo sugerem que este método apresenta bons resultados em uma ampla faixa de solos, variando de arenosos a argilosos e de calcários a muito ácidos. A capacidade desses solos de disponibilizar K varia muito quando analisados por meio da resina, porém vários deles apresentam quantidades similares de K extraído com extratores químicos convencionais (SKOGLEY, 1994).

Em alguns Estados brasileiros, o método da resina de troca iônica tem sido utilizado com êxito para o diagnóstico da disponibilidade de nutrientes no solo, especialmente P e K em uma grande variedade de solos. Nestas condições, este método tem apresentado correlações mais elevadas entre os teores de K e a resposta das plantas em comparação com os métodos convencionais (RAIJ, 1991). Cabe ressaltar que o método da resina trocadora de íons, em uso em cerca de um terço dos laboratórios de análise de solo no Brasil, apresenta resultados muito diferentes de P em comparação com outros métodos, mas, para os teores de K^+, Mg^{2+} e Ca^{2+} trocáveis, os resultados não diferem daqueles obtidos com a solução de acetato de amônio (RAIJ et al., 1986).

Diversos resultados de pesquisa têm mostrado que, de modo geral, as quantidades de K obtidas pelos diferentes métodos, em cada fração, apresentam correlação alta entre si. Novozamsky e Houba (1987) observaram boa relação entre o K extraído por eletro-ultrafiltração e os teores deste nutriente extraídos por $CaCl_2$ 0,001 M em 84 solos de 21 localidades da Holanda.

Os resultados obtidos por Nachtigall e Vahl (1989) mostram que o K trocável (extraído por acetato de amônio a pH 7,0) apresentou boa relação ($r^2 = 0,95^{**}$) com aquele extraído pelo método Mehlich 1 (HCl 0,05 mol L^{-1} +

H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}), que é utilizado para avaliar a disponibilidade deste nutriente nos laboratórios de análise de solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. O valor "b" da equação (K trocável = - 0,06 + 1,87 K extraível) mostra que a solução Mehlich 1 extraiu, em média, 53% do K trocável do solo. Entretanto, a relação entre essas duas variáveis é melhor quando as amostras são separadas em dois grupos distintos (Figura 3A). O coeficiente de regressão foi de 0,97** quando as amostras dos solos nos quais predominam argilo-minerais 2:1 foram excluídas da regressão geral. Para o grupo de solos nos quais predominam argilo-minerais 2:1, o coeficiente de regressão entre o K trocável e o extraível pelo método Mehlich 1 foi de 0,99**. Considerando-se os teores médios de cada grupo de amostras, constata-se que o método Mehlich 1 extraiu 76% do K trocável no grupo de solos com predomínio de argilo-minerais 1:1 e naquele com argilo-minerais 2:1 extraiu somente 47%.

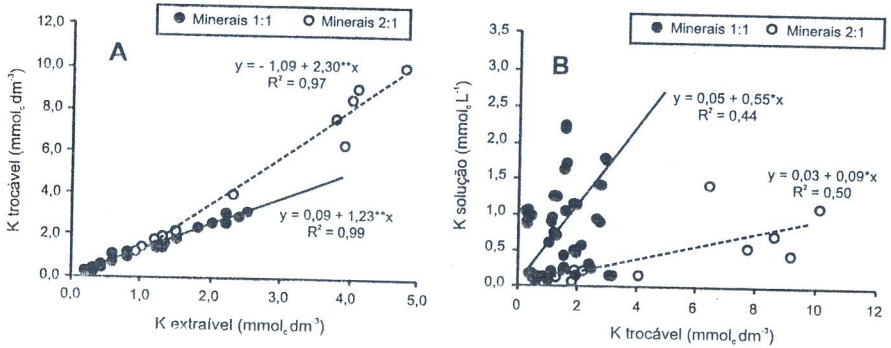

Figura 3. Relação entre os teores de potássio trocável (extraídos por acetato de amônio a pH 7,0) e os teores de potássio extraível pelo método Mehlich 1 (A) e de potássio na solução do solo (B) de 44 solos da região sul do Rio Grande do Sul.

Fonte: NACHTIGALL e VAHL (1989).

Esses dados indicam que o K extraível pelo método Mehlich 1 é uma fração do K trocável mais fracamente adsorvida à fase sólida do solo. Esta fração é menor nos solos em que predominam argilo-minerais 2:1. A fração do K não extraída pela solução deste método provavelmente é constituída de K adsorvido a sítios de troca que possuem certo grau de seletividade para K, sendo acessível ao acetato de amônio a pH 7,0, porém não à mistura ácida do método Mehlich 1.

A Figura 3B mostra a relação entre os teores de K trocável e de K na solução do solo, podendo-se observar o mesmo comportamento em relação ao tipo de argilo-mineral predominante nos solos, o que indica que a natureza da fração argila pode influenciar a determinação da magnitude da disponibilidade de K no solo. Este fato merece destaque, já que nos procedimentos atualmente utilizados para avaliar a disponibilidade deste nutriente no solo não é levado em conta o efeito do tipo de solo. Em muitos casos, o teor de K disponível no solo não é o único parâmetro que permite determinar a disponibilidade do nutriente, de modo que outros fatores, como a natureza dos minerais de argila e a capacidade de troca de cátions (CTC), devem ser considerados.

A Figura 4 mostra as relações entre os teores de K extraídos pela resina de troca iônica e os métodos Mehlich 1, acetato de amônio a pH 7,0 e HNO_3 fervente e entre os teores de K extraídos pelos métodos Mehlich 1 e acetato de amônio a pH 7,0 de um Latossolo Bruno alumínico câmbico do Rio Grande do Sul, podendo-se observar boa relação entre os extratores utilizados (CARRARO et al., 2003). Considerando-se os teores médios de cada extrator, constata-se que o método da resina extraiu 63%, 47% e 58% do K extraível pelos métodos Mehlich 1, acetato de amônio a pH 7,0 e HNO_3 fervente, respectivamente, enquanto o método Mehlich 1 extraiu 75% do K extraível pelo método do acetato de amônio a pH 7,0.

As relações entre as frações de K no solo também têm sido estudadas. Nachtigall e Vahl (1989) avaliaram as relações entre as formas trocáveis, não-trocáveis e totais de K em 44 solos da região sul do Rio Grande do Sul e observaram que as relações não foram significativas quando os solos foram reunidos em um único grupo, o que os autores atribuíram ao fato de que a falta de relação seja conseqüência das diferenças na constituição mineralógica dos solos. Entretanto, observaram que houve boa correlação entre o K não-trocável e o K total, entre o K trocável e o K total e entre o K trocável e o K não-trocável para os solos cujo material de origem não é o granito. Para os solos originados de granito, não houve relação entre essas formas de K. Resultado semelhante também foi encontrado por Mielniczuk e Selbach (1978). Silva et al. (2000), estudando formas, relação quantidade/intensidade e biodisponibilidade de K em diferentes latossolos,

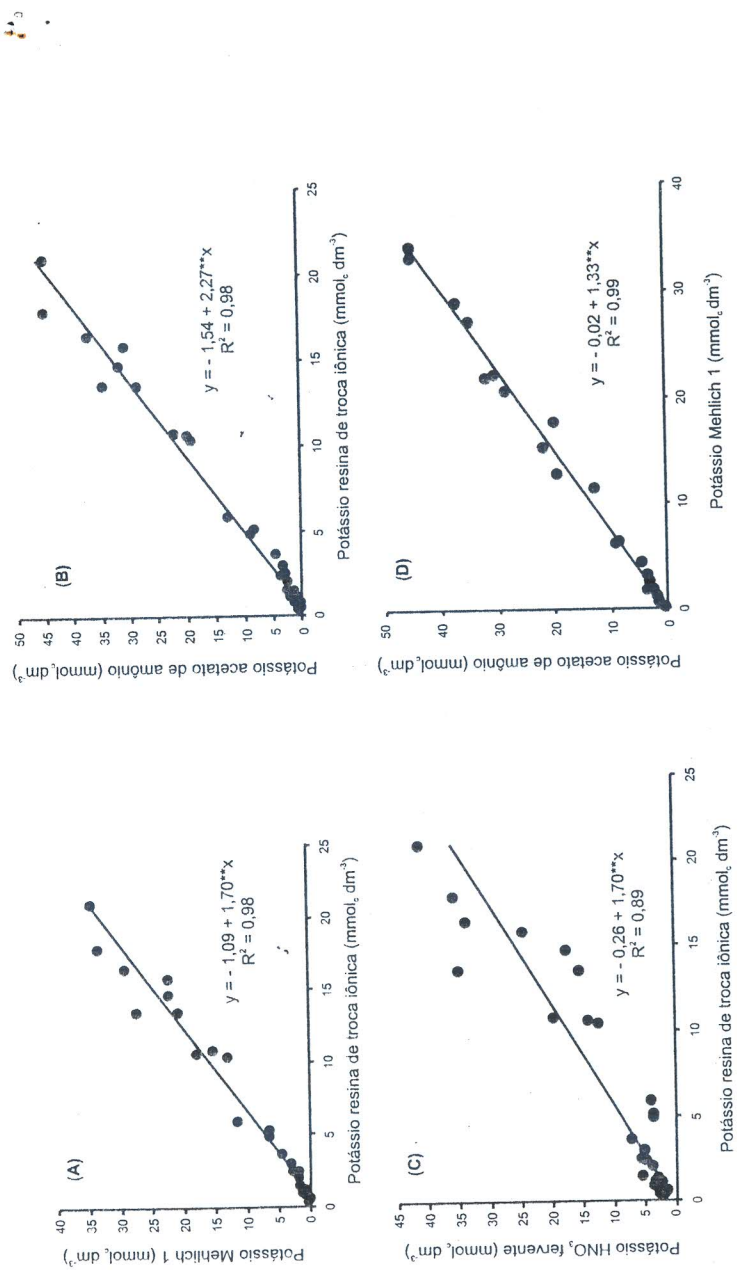

Figura 4. Relação entre os teores de potássio extraídos pela resina de troca iônica e pelos métodos Mehlich 1 (A), acetato de amônio a pH 7,0 (B) e HNO_3 fervente (C) e entre os teores de potássio extraídos pelo método Mehlich 1 e acetato de amônio a pH 7,0 (D) de um Latossolo Bruno alumínico câmbico do Rio Grande do Sul.

Fonte: Adaptada de CARRARO et al. (2003).

não observaram relação significativa entre o K total e o K não-trocável e entre o K trocável e o K não-trocável. Contudo, verificaram relação significativa entre o K total e o K trocável.

5. INTERPRETAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO NO SOLO

As formas de K disponíveis no solo são identificadas, de modo geral, pelo K trocável extraído com acetato de amônio a pH 7,0, presente nos diferentes sítios de adsorção, formas que também podem ser estimadas por outros extratores, como o Mehlich 1 e a resina de troca iônica, entre outros, e pelo K não-trocável extraído por ácido sulfúrico ou nítrico fervente, resultante da dissolução de minerais potássicos (MIELNICZUK e SELBACH, 1978; NACHTIGALL e VAHL, 1991a; SILVA et al., 1995). Considera-se que o K não-trocável representa a reserva de médio prazo e o K trocável a forma prontamente disponível (MIELNICZUK e SELBACH, 1978).

A relação entre o K trocável do solo e a resposta de culturas a este nutriente, expressa na forma de produção relativa, foi demonstrada no trabalho pioneiro de Bray (1948) sobre calibração de análise de solo, que serviu de modelo para inúmeros trabalhos de pesquisa posteriores, inclusive do Brasil.

Diversos resultados de pesquisa estabelecem os limites de classes de teores de K no solo, considerando o K trocável como parâmetro de diagnóstico, para as mais variadas culturas. A Figura 5, que estabelece a correlação entre a resposta das culturas de algodão, feijão e cana-de-açúcar e os teores de K trocável no solo, é um exemplo deste tipo de procedimento (RAIJ, 1991). Verifica-se que é possível estabelecer uma correlação única para estas diferentes culturas, embora exista uma relativa dispersão de pontos. Em outras situações ocorre baixa correlação entre o teor de K no solo e a produção. Tanto a dispersão dos pontos, descrita no exemplo da Figura 5, como baixas correlações entre a disponibilidade de K nos solo e a produção, podem ser atribuídas a fatores climáticos, do solo e de manejo da cultura.

Diversos resultados de pesquisa mostram que para a interpretação das análises de solo para fins de recomendação de adubação potássica,

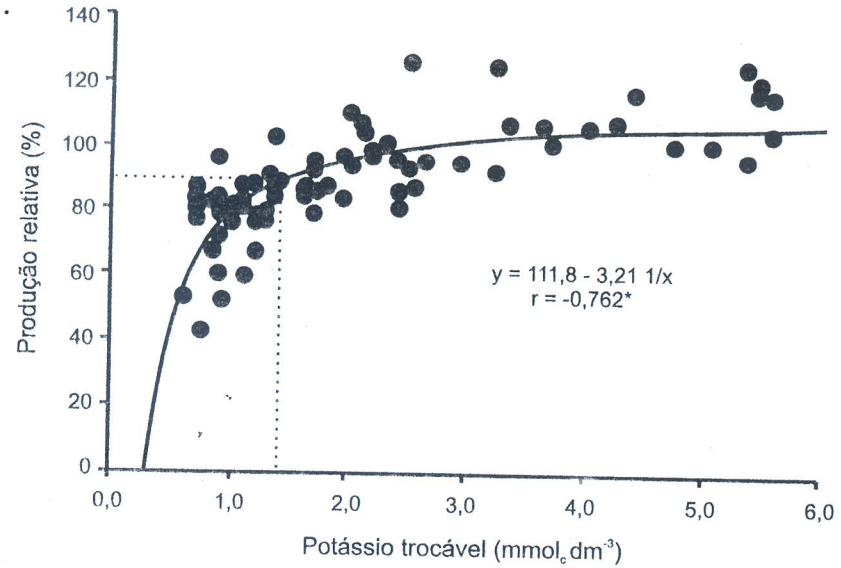

Figura 5. Relação entre a resposta de três culturas à adubação potássica e os teores de potássio nos solos.
Fonte: RAIJ (1991).

a inclusão de fatores do solo, como teor de argila, CTC ou argilo-minerais predominantes, pode contribuir para melhorar a capacidade de diagnóstico dos métodos em uso (GIANELLO e MIELNICZUK, 1981; MIELNICZUK, 1982; BRAGA e YAMADA, 1984).

Silva e Meurer (1988), avaliando a disponibilidade de K em 14 solos do Rio Grande do Sul, observaram relativo grau de dispersão nos pontos da relação entre o rendimento de matéria seca e a concentração de K no solo quando foram reunidos todos os solos, sendo somente 59% da variação nos rendimentos explicada pela variação nos teores de K trocável dos solos. Entretanto, quando os autores separaram os solos em três grupos, segundo a capacidade de troca de cátions (CTC), houve melhor caracterização da disponibilidade de K para as plantas.

A inclusão do teor de argila dos solos na interpretação das análises de K também pode aumentar a eficiência do diagnóstico da disponibilidade deste nutriente nos solos (Figura 6). Neste caso, foram estabelecidas as relações entre a produção relativa de trigo e a disponibilidade de K determinada pelo método Mehlich 1 em 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, divididos em três grupos em função do teor de argila. Observa-se que para cada grupo a produção relativa máxima de trigo foi obtida com diferentes teores de K no solo, de modo que quanto maior foi o teor de argila, maior foi o teor de K necessário para obter a máxima produção.

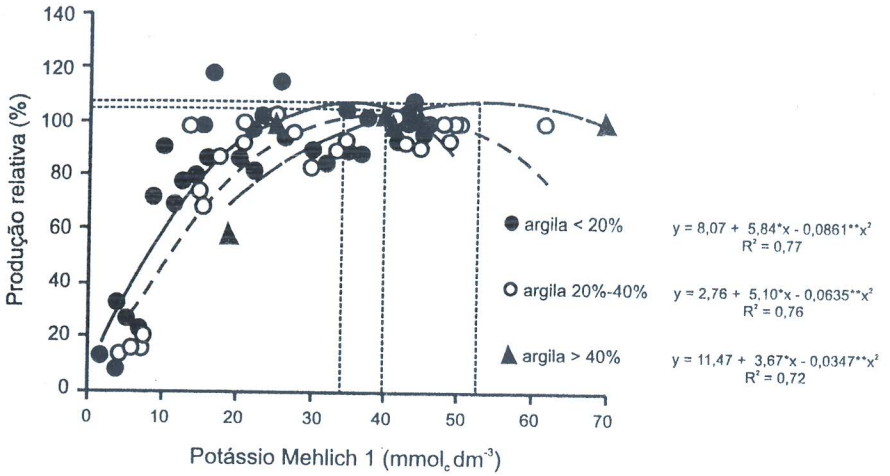

Figura 6. Relação entre a produção relativa de trigo e os teores de potássio extraíveis pelo método Mehlich 1 em 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, divididos em função do teor de argila.

Da mesma forma, a separação dos solos segundo o tipo de argilo-mineral predominante pode proporcionar aumento da eficiência do diagnóstico da disponibilidade de K nos solos. Na Figura 7 são estabelecidas as relações entre a produção relativa de trigo e a disponibilidade de K determinada pelo método Mehlich 1 em 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, divididos em dois grupos em função do tipo de argilo-mineral predominante no solo. Observa-se que para cada grupo a produção relativa máxima de trigo foi obtida com diferentes teores de K no solo, sendo a produção relativa máxima dos solos com predomínio de argilo-minerais 2:1 obtida com teores mais altos deste nutriente do que nos solos nos quais predominam argilo-minerais 1:1.

Atualmente, nenhum sistema de recomendação de adubação potássica utilizado no Brasil inclui na interpretação das análises de K do solo

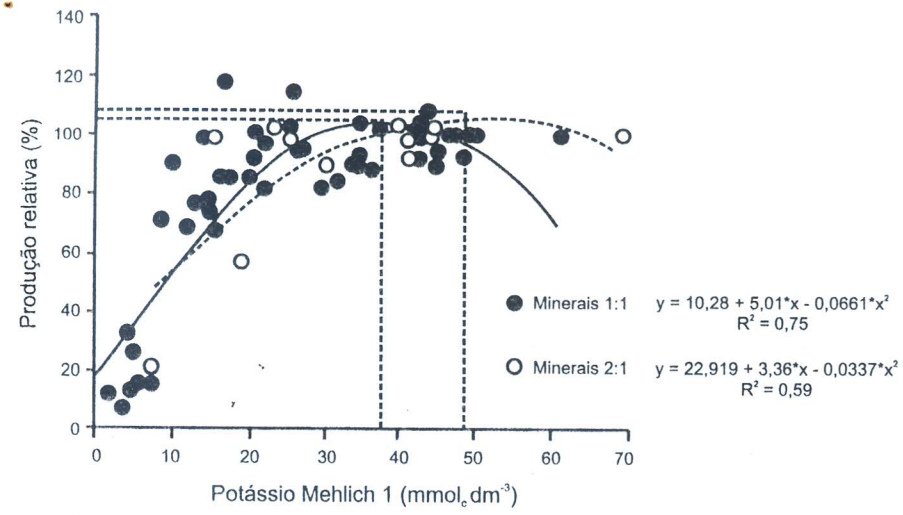

Figura 7. Relação entre a produção relativa de trigo e os teores de potássio extraíveis pelo método Mehlich 1 em 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, divididos em função da mineralogia.

variáveis como teor de argila, CTC ou argilo-mineral predominante, com exceção da recomendação de adubação corretiva de K para culturas anuais em solos de Cerrado e da recomendação de adubação potássica para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

Para os solos de Cerrado, a recomendação de adubação corretiva de K foi subdividida em duas classes de CTC: solos com CTC a pH 7,0 menor ou igual a 4,0 cmol$_c$ dm^{-3}; solos com CTC a pH 7,0 maior ou igual a 4,0 cmol$_c$ dm^{-3} (SOUZA e LOBATO, 2004).

Para os solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a recomendação de adubação corretiva de K foi subdividida em três classes de CTC: solos com CTC a pH 7,0 menor ou igual a 5,0 cmol$_c$ dm^{-3}; solos com CTC a pH 7,0 entre 5,1 e 15,0 cmol$_c$ dm^{-3}; solos com CTC a pH 7,0 maior do que 15,0 cmol$_c$ dm^{-3} (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2004).

Para o Estado de Minas Gerais, pelo fato de que na maioria dos solos o efeito da capacidade tampão para K é desprezível, não influenciando a eficiência de extração deste nutriente pelo método Mehlich 1 nem sua

absorção pelas plantas, é adotada uma única classificação para este nutriente, sendo teores entre 1,8 e 3,1 mmol$_c$ dm^{-3} considerados bons (RIBEIRO et al., 1999).

No Estado de São Paulo, o teor de K no solo é um índice considerado melhor para avaliar a disponibilidade do nutriente do que a relação com outros cátions ou a porcentagem da CTC, em que teores entre 1,6 e 3,0 mmol$_c$ dm^{-3} são considerados adequados (RAIJ et al., 1996).

Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, teores de K no solo, extraível pelo método Mehlich 1, entre 2,1 e 3,1 mmol$_c$ dm^{-3} são considerados suficientes (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC, 1995).

No sistema de recomendação de adubação potássica usado para os solos do Alabama (Estados Unidos), os solos foram divididos em três grupos, de acordo com a textura e a CTC, utilizando os níveis críticos estabelecidos pelo método Mehlich 1 (COPE e ROUSE, 1973).

Outro aspecto que merece destaque na interpretação da disponibilidade de K dos solos é a relação deste com os demais cátions trocáveis, principalmente Ca e magnésio (Mg), já que a relação entre K, Ca e Mg afeta os teores do primeiro na solução do solo, pois quanto maiores os teores de Ca e Mg no solo, menor é a disponibilidade de K (RAIJ, 1982). Contudo, ainda existem poucas informações sobre a influência destes cátions sobre a disponibilidade de K dos solos.

A avaliação das reservas de K a médio prazo (K não-trocável, extraível por HNO_3 fervente) ainda merece estudos mais aprofundados para o entendimento de sua dinâmica no solo. Mielniczuk e Selbach (1978) observaram que a redução dos teores de K no solo cultivado ocorre ao mesmo tempo para as formas de K (K trocável e K HNO_3), mesmo quando há adições periódicas. Já Nachtigall e Vahl (1991b), estudando a dinâmica de liberação de K para as plantas, destacam que o K trocável tende a diminuir assintoticamente até níveis mínimos, que variam com o tipo de solo, a partir do qual a forma K-HNO_3 passa a controlar a disponibilidade.

A determinação dos teores de K não-trocável ainda não é utilizada de forma rotineira, provavelmente pela dificuldade analítica encontrada

pelos laboratórios e pela variabilidade dos resultados referentes à sua interpretação. Contudo, já existem resultados experimentais que mostram que é necessário dedicar maior atenção ao assunto.

Para Minas Gerais, Silva et al. (2000), ao avaliar a capacidade em fornecer K de quatro Latossolos da zona fisiográfica dos Campos das Vertentes-MG para duas espécies florestais nativas (angico-amarelo e cássia-verrugosa) e para milho, não observaram relação significativa entre os teores de K não-trocável e a produção de matéria seca. Contudo, outros resultados mostram haver considerável contribuição do K não-trocável para a nutrição das plantas.

No sul do Brasil, Oliveira et al. (1971), trabalhando com cinco solos do Rio Grande do Sul, constataram que o K absorvido por sete cortes de azevém perene superou amplamente os teores de K trocável ou de reserva, determinados por método químico. Nachtigall e Vahl (1991b), trabalhando com 11 solos da região sul do Rio Grande do Sul, observaram que houve relação significativa entre o K extraído pela parte aérea das plantas de milho e azevém, em seis cultivos sucessivos, e os teores de K extraídos pelo HNO_3 fervente ($r^2 = 0,67^*$). Esta relação foi melhor ($r^2 = 0,92^{**}$) quando as amostras dos solos Luvissolo Hipocrômico Órtico típico e Neossolo Litólico distrófico típico foram excluídas do estudo.

Em trabalho similar, Crisóstomo e Castro (1970), trabalhando com amostras superficiais de 20 solos do Ceará, submetidas a quatro cultivos sucessivos de milho, observaram que o K extraído pelo milho superou os teores trocáveis, mas foi, em média, inferior ao K extraído por HNO_3 fervente.

Castilhos e Meurer (2002), ao avaliar o suprimento de K de dois Planossolos, um Chernossolo e um Gleissolo do Estado do Rio Grande do Sul, para a cultura do arroz irrigado por alagamento, observaram que os teores de K não-trocável dos solos (K extraído por HNO_3 fervente subtraído do K extraído por NH_4O-Ac 1 mol L^{-1} a pH 7,0) ficaram reduzidos após 50 dias de cultivo em casa de vegetação. Os autores concluíram que o K trocável não foi a única forma do elemento no solo que supriu a demanda pelas plantas, ocorrendo contribuição de formas de K não-trocável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os teores insuficientes de K dos solos brasileiros contrastam com as elevadas exigências deste nutriente pelas culturas, o que tem proporcionado grande aumento de consumo de adubo potássico para acompanhar o vertiginoso crescimento da produção agrícola brasileira nos últimos anos.

O diagnóstico adequado das necessidades das plantas neste nutriente, aliado a uma recomendação precisa de adubo potássico, são fatores importantes para o aumento da qualidade e da produtividade das culturas. A literatura científica registra grande diversidade de métodos de análise de K em solos, em geral com o objetivo de determinar formas específicas do elemento, bem como número expressivo de resultados de pesquisa visando estabelecer recomendação de adubação potássica para as mais variadas culturas e tipos de solo.

Os resultados de pesquisa obtidos ao longo dos anos indicam que apenas para o K trocável existem informações em quantidades satisfatórias para estabelecer limites de disponibilidade nos solos. Contudo, os métodos utilizados para a avaliação do K trocável no solo, de forma rotineira, nem sempre quantificam a real disponibilidade do nutriente no solo. Deste modo, deve-se buscar a inclusão de outras variáveis do solo para a interpretação das análises de K, para algumas regiões e tipos de solos, visando aumentar a eficiência do diagnóstico. Por outro lado, o conhecimento sobre as reservas de K do solo (formas não-trocáveis) merece maior atenção.

7. REFERÊNCIAS

ADAMS, F. Soil solution. In: CARSON, E. W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 441-481.

BRAGA, J. M.; YAMADA, T. Uso eficiente de fertilizantes potássicos. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília. **Anais**... Brasília: EMBRAPA, ANDA, POTAFOS, 1984. p. 291-322.

BRAY, R. H. Correlation of soil tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirements. In: KITCHEN, H. B. (Ed.). **Diagnostic techniques for soils and crops**. Washington: American Potash Institute, 1948. p. 53-86.

CARRARO, H. R.; NACHTIGALL, G. R.; CAMBRI, M. A.; ALLEONI, L. R. F. Distribuição do potássio no perfil do solo em função de aplicações sucessivas de adubo potássico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Resumos expandidos**... Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.

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

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1995. 223 p.

COPE, J. T.; ROUSE, R. D. Interpretation of soil test results. In: DINAEUR, R.C. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p. 23-33.

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

DIEST, A. van. Factors affecting the availability of potassium in soil. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., 1978, Bern. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1979. p. 75-97.

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

GOEDERT, W. J. **Cation equilibria in soils of Rio Grande do Sul, Brazil**. 1973. 167 f. Thesis (Ph. D. in Soils)–University of Wisconsin, Madison, 1973.

GOULDING, K. W. T. Potassium fixation and release. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 20., 1987, Baden bei Wien. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1987. p. 137-154.

GRIMME, H.; NÉMETH, K. The evaluation of soil K status by means of soil testing. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., 1978, Bern. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1979. p. 99-108.

HELMKE, P. A.; SPARKS, D. L. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: BIGHAM, J. M. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 3. Chemical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 551-574. (Book Series, 5).

HESSE, P. R. **A textbook of soil chemical analysis**. New York: Chemical Publishing, 1972. 520 p.

LOPES, A. S. Mineralogia do potássio em solos do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Anais**... Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. p. 51-65.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 849 p.

METSON, A. J. The long-term potassium-supplying power of New Zealand soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 9., 1968, Adelaide. **Proceedings**... Adelaide: International Society of Soil Science, 1968. v. 2. p. 621-630.

MIELNICZUK, J. **O potássio no solo**. 4. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 80 p. (Boletim Técnico, 2).

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

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

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

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

NOVOZAMSKY, I.; HOUBA, V. J. G. Critical evaluation of soil testing methods for K. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 20., 1987, Baden bei Wien. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1987. p. 137-154.

OLIVEIRA, V.; LUDWICK, A. E.; BEATTY, M. T. Potassium removed from Southern Brazilian soils by exhaustive cropping and chemical extraction methods. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, p. 763-767, 1971.

PRATT, P. F. Digestion with hydrofluoric and perchloric acids for total potassium and sodium. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 2. Madison: American Society of Agronomy, 1965a. p. 1019-1021.

PRATT, P. F. Potassium. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 2. Madison: American Society of Agronomy, 1965b. p. 1022-1030.

QUÈMÈNER, J. State of potassium in the soil and consequences for plant nutrition. **Potash Review**, Bern, Section 16, v. 104, p. 1-10, 1986.

RAIJ, B. van. Disponibilidade de potássio em solos do Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Anais**... Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. p. 67-76.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Palo Alto, v. 17, p. 544-566, 1986.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

REICHENBACH, H. G. von. Factors of mica transformation. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 9., 1972, Landshut. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1972. p. 33-42.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. V. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RITCHEY, K. D. **O potássio nos Oxissolos e Ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 69 p. (Boletim Técnico, 7).

SCHROEDER, D. Relationship between soil potassium and the potassium nutrition of the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., 1978, Bern. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1979. p. 43-63.

SCHROEDER, D. Relationship between soil potassium and the potassium nutrition of the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 10., 1974, Budapest. **Proceedings**... Bern: International Potash Institute, 1975. p. 53-63.

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

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

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

SKOGLEY, E. Nuevo método de análisis de potasio en el suelo. **Informaciones Agronómicas**, Acassuso, v. 16, p. 1-3, 1994.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 3. ed. New York: Macmillan Publishing, 1975. 694 p.