

FORMAS DE POTÁSSIO EM SOLOS DE VÁRZEA E SUA DISPONIBILIDADE PARA O FEIJOEIRO⁽¹⁾

M. R. VILLA⁽²⁾, L. A. FERNANDES⁽³⁾ & V. FAQUIN⁽⁴⁾

RESUMO

O presente estudo teve como objetivos caracterizar as formas de K em solos de várzea e o aproveitamento dessas formas pela planta, avaliar a resposta do feijoeiro à aplicação desse nutriente nesses solos e determinar os seus níveis críticos nos solos e nas plantas. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 5, com quatro repetições, sendo quatro solos de várzea [Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háplico (GX), Neossolo Flúvico (RU) e Organossolo Mésico (OY)] e cinco níveis de saturação por K da CTC potencial (natural, 4, 6, 8 e 10 %). Foram cultivadas quatro plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) por vaso até a produção de grãos. Amostras dos solos foram coletadas para a determinação do K total, não-trocável, trocável, em solução, disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina e medidas da relação Quantidade/Intensidade de K. Os teores de K total e K não-trocável foram maiores nos solos OY e RU, enquanto os teores de K trocável e K em solução foram maiores nos solos OY e GM. As saturações críticas por K da CTC potencial foram de 5,0, 4,1, 8,7 e 5,3 %, enquanto os níveis críticos de K foliar foram de 17,9, 30,5, 16,8 e 14,6 mg kg⁻¹, para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente.

Termos para indexação: extratores de potássio, relação solo-planta, química do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em dezembro de 2001 e aprovado em julho de 2004.

⁽²⁾ Pós-Graduando do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mail: mvila@ufla.br

⁽³⁾ Professor do Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Caixa Postal 135, CEP 39404-006 Montes Claros (MG). E-mail: larnaldo@ufmg.br

⁽⁴⁾ Professor do Departamento de Ciência do Solo, UFLA. Bolsista do CNPq. E-mail: vfaquin@ufla.br

SUMMARY: *POTASSIUM FORMS IN LOWLAND SOILS AND AVAILABILITY TO COMMON BEAN*

*The present study had as objectives to characterize K forms, plant use of these forms and to evaluate the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) response to K application in four lowland soils. It was also sought to determine the critical levels for K in soils and plant. The experimental design was completely randomized in a 4 x 5 factorial scheme with four replications. The treatments were a combination of four lowland soils [Mesic Organosol (OY), Melanic Gleysoil (GM), Haplic Gleysoil (GX), and Fluvi Neosol (RU)] and five K CEC saturation levels (native, 4, 6, 8, and 10 %). Four bean plants per pot were cultivated until grain production. Soil samples were analyzed for total K, non-exchangeable K, exchangeable K, soil solution K, available K by Mehlich-1 and K extractable by a cation exchange resin. The K quantity/intensity ratio was also determined. The concentration of total and non-exchangeable K were higher in OY and RU soils, while exchangeable K and soil solution K were higher in O and GH soils. The critical K saturation of CEC were 5.0, 4.1, 8.7, and 5.3 % and the critical foliar K levels were 17.9, 30.5, 16.8, and 14.6 mg kg⁻¹ for OY, GM, GX, and RU soils, respectively.*

Index terms: potassium extractors, soil - plant relationship, soil chemistry.

INTRODUÇÃO

O K no solo apresenta-se em diversas formas, muitas das quais não-disponíveis às plantas. Considerando sua disponibilidade para as plantas, o K do solo pode ser classificado em quatro categorias, que seguem uma ordem crescente de disponibilidade: estrutural (mineral), não-trocável ou dificilmente disponível, trocável e em solução, que, somadas, fornecem o K total (Tisdale & Nelson, 1993). Como essas frações encontram-se em equilíbrio dinâmico (Sparks, 1980), extratores químicos específicos têm sido utilizados nas suas quantificações, tendo como vantagem permitir a comparação das formas de K sob diferentes condições.

O K não-trocável compreende o K adsorvido nas entrecamadas de minerais de argila 2:1 e uma parte do K contido em minerais primários de mais fácil intemperização (Mielniczuk & Selbach, 1978), comumente extraído com HNO₃ fervente (Knudsen et al., 1982). A diferença entre a fração assim extraída e a fração trocável constitui a fração de K não-trocável do solo, a qual representa a porção do K do solo que será liberada a médio prazo.

A fração de K solúvel é constituída pelo K que se encontra na solução do solo, em dado momento, sob condições normais de umidade e livre de forças de adsorção (Reitemeier, 1951). Essa fração apresenta uma pequena participação em relação ao K total do solo, e a sua avaliação apenas demonstra a disponibilidade momentânea de K para as plantas (Tisdale & Nelson, 1993). Contudo, sua importância pode, às vezes, ser significativa, visto que, em determinadas situações, o K da solução é o principal fator a influenciar a absorção deste nutriente pelas plantas (Gianelo & Mielniczuk, 1981).

Para melhorar a avaliação da disponibilidade de K para as plantas, é importante que se tenha conhecimento não só dos fatores quantidade (K-trocável) e intensidade (K-solução), mas também da relação entre esses dois fatores que constitui o Poder Tampão de Potássio (PTK) do solo, ou seja, a capacidade que o solo tem em manter certa concentração de K na solução, quando da absorção pelas plantas ou de perdas ocorridas no solo (Goedert et al., 1975; Mielniczuk, 1982).

A relação quantidade/intensidade (Q/I) foi desenvolvida por Beckett (1964), após confirmação da Lei da Relação estabelecida por Schofield (1947), citado por Goedert et al. (1975), que introduziu o conceito de potencial químico como propriedade relacionada com a disponibilidade de nutrientes às plantas. O conceito de quociente de atividade de K (QAK), dado pela relação $aK/(aCa)^{0.5}$, é uma medida do potencial químico do K em relação ao do cálcio presente na solução do solo (Beckett, 1964). Segundo esse autor, a disponibilidade de K no solo ou sua troca pelo Ca depende do potencial de K e do potencial de Ca. Como o Ca e o Mg apresentam propriedades de troca muito semelhantes, eles podem ser considerados como sendo uma única espécie e, dessa maneira, o QAK pode ser calculado como $aK/(aCa + aMg)^{0.5}$ (Beckett, 1964).

Segundo Beckett & Nafady (1967), quando se está estudando o termo quantidade em relação ao QAK, este deve ser medido em termos de ΔK . Este termo representa a quantidade de K adsorvido (+ ΔK) ou desorvido (- ΔK) pelo solo quando em equilíbrio com soluções de diferentes QAK. Estudando solos de Oxford, Beckett (1964) verificou que a tendência dos gráficos da relação Q/I para os solos estudados era a mesma, uma parte superior linear e uma inferior na forma de curva assintótica em relação ao eixo ΔK .

Como a inclinação da parte reta $\Delta K/\Delta QAK$ representa o poder tampão de K do solo (PTK), em concentrações baixas de K trocável, maiores valores serão obtidos mediante o aumento do coeficiente de seletividade, ou seja, maior retenção de K em relação ao Ca mais Mg (Mielniczuk, 1978). A parte inferior do gráfico representa a quantidade total de K trocável no solo, sendo o K preferencial (posições “e” e “i”) dado pela diferença entre os valores de ΔK correspondente à extremidade da região curva e à extrapolação da região reta do gráfico. O K planar, deste modo, é a diferença entre o K trocável total e o K preferencial (Mielniczuk, 1978; Beckett & Nafady, 1967).

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

O presente estudo teve como objetivos caracterizar as formas de K no solo, avaliar a resposta do feijoeiro à aplicação desse nutriente em solos de várzea e determinar os níveis críticos de K nesses solos e nas plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras (MG). Utilizaram-se amostras da camada de 0,0–0,2 m de quatro solos de várzea: Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX), Neossolo Flúvico (RU) e Organossolo Méssico (OY), coletados na camada superficial (0–20 cm), em uma única várzea não sistematizada no município de Lavras (MG). A coleta das amostras e o experimento foram realizados no período de 1996 a 1998.

Inicialmente, amostras de 4 kg dos solos foram incubadas por 30 dias, mantendo-se a umidade próxima à capacidade campo, com CaCO_3 e MgCO_3 p.a. na relação equivalente de Ca:Mg de 4:1, para elevar a saturação por bases a 50 %. Após esse período, os solos foram secos ao ar e analisados quanto aos seus atributos químicos, físicos e mineralógicos (Quadro 1).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 5, sendo quatro solos de várzea (GM, GX, RU e OY) e cinco níveis de saturação por K da CTC potencial (natural, 4, 6, 8 e 10 %), com quatro repetições. As doses de K necessárias para atingir os níveis de saturação da CTC potencial foram de: 28,1, 112,3, 196,6 e 280,8 mg dm^{-3} de K, respectivamente, para o solo OY; 78,0, 187,2, 296,4 e 405,6 mg dm^{-3} de K, para o solo GM; 46,0, 92,4, 138,8 e 185,3 mg dm^{-3} de K,

para o solo GX, e 59,9, 126,4, 195,9 e 265,2 mg dm^{-3} de K, para o solo RU. No tratamento saturação por K natural, esta correspondeu a 3,3, 2,6, 1,9 e 2,4 %, para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente, valores calculados com base nos dados apresentados no quadro 1.

Juntamente com os níveis de K referentes aos tratamentos, foi aplicada uma adubação básica de sementeira com 80 mg de N, 300 mg de P, 40 mg de S, 0,5 mg de B, 1,5 mg de Cu e 5 mg dm^{-3} de Zn de solo, na forma de reagentes p.a.: KNO_3 , KH_2PO_4 , K_2SO_4 , H_3PO_4 , NH_4NO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, H_3BO_3 , CuSO_4 , ZnSO_4 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Essas amostras permaneceram em incubação por 30 dias.

No final desse período, subamostras de 1 kg de cada vaso foram retiradas para análises químicas e os 3 kg restantes foram colocados em vasos com capacidade de 4 dm^3 para o cultivo de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Carioca - MG). Durante o período experimental, foram cultivadas quatro plantas por vaso, as quais receberam adubações de coberturas com N na forma de NH_4NO_3 , na dose de 175 mg dm^{-3} de N, para a dose zero de K, e 200 mg dm^{-3} de N, para os demais tratamentos, parcelados em três vezes, até à época do pré-florescimento.

Foram coletadas amostras de solo imediatamente após a aplicação dos tratamentos de saturação por K e após o cultivo do feijoeiro, para determinar as formas de K, ou seja, K total (K_{tot}), K não-trocável (K_{nt}), K trocável (K_{t}) e K na solução (K_{sol}).

Os teores totais no solo foram determinados após digestão lenta em banho de areia com HF, HClO_4 e HNO_3 concentrados (Knudsen et al., 1982). O K trocável foi determinado pelo NH_4OAc 1 mol L^{-1} pH 7,0 (Mielniczuk, 1978), e o K disponível pelo Mehlich-1 (Embrapa, 1997) e pela resina de troca iônica (Raij et al., 1987). A fração de K não-trocável foi obtida pela diferença entre a fração extraída com HNO_3 1 mol L^{-1} por 10 minutos de fervura e aquela obtida com NH_4OAc 1 mol L^{-1} pH 7,0. O K da solução foi avaliado conforme Mielniczuk (1978).

As quantidades de K, consideradas liberadas de formas não prontamente disponíveis (K_{nt}) e de formas prontamente disponíveis (K_{t}) durante o cultivo, foram calculadas por diferença entre as concentrações inicialmente presentes no solo e após o cultivo, bem como pelo total absorvido pelo feijoeiro (Quadro 2).

As medidas da relação quantidade/intensidade (Q/I) foram determinadas nas subamostras após a incubação com calcário, conforme método descrito por Mielniczuk (1978). A adsorção (ΔK positivo) ou dessorção (ΔK negativo) de K nos solos foram determinadas pela diferença entre a concentração do elemento nas soluções iniciais e de equilíbrio. O quociente de atividade de K (QAK) foi determinado pela relação de atividade de acordo com a equação: $\text{QAK} = aK^+ / (a\text{Ca}^{2+} + a\text{Mg}^{2+})^{0,5}$.

Quadro 1. Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos: Gleissolo Háplico (GX), Neossolo Flúvico (RU), Gleissolo Melânico (GM) e Organossolo Méstico (OY)⁽¹⁾

Solo	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	t	T	m	V	CMAP	PR
		- mg dm ⁻³ -		cmol _c dm ⁻³				%		mg kg ⁻¹	mg L ⁻¹		
GX	4,5	3	36	0,6	0,2	1,1	6,3	2,0	7,2	55	12	648	28
RU	4,7	3	103	2,7	1,1	0,2	4,5	4,3	8,6	5	47	689	27
GM	4,7	8	51	0,7	0,2	1,6	13,7	2,6	14,7	61	7	2.404	2
OY	4,6	6	76	1,6	1,2	0,9	9,8	3,9	12,8	23	23	1.051	16
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Matéria orgânica	Densidade do solo	Densidade de partícula		Superfície específica			
		g kg ⁻¹					g cm ⁻³		m ² g ⁻¹				
GX		30	611	179	180	31	1,0	2,7		121			
RU		0	179	471	350	31	0,8	2,8		137			
GM		10	230	390	370	230	0,4	1,8		335			
OY		0	120	570	310	44	0,6	2,1		181			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe _d	Fe _o	Fe _o /Fe _d	Gb	Ct		
		g kg ⁻¹											
GX		84,2	112,2	13,0	6,2	0,1	1,8	0,6	0,33	19	65		
RU		209,3	221,1	74,5	9,3	0,5	12,3	0,5	0,04	49	143		
GM		126,1	175,5	13,3	5,5	1,5	2,3	0,6	0,26	53	48		
OY		243,4	247,1	42,8	7,3	0,5	5,3	0,5	0,09	57	121		

⁽¹⁾ pH = pH em água; P = fósforo pelo Mehlich-1; PR = P remanescente; CMAP = capacidade máxima de adsorção de P; SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e P₂O₅ (Embrapa, 1997); Fe_d = ferro ditionito, Fe_o = ferro oxalato, Fe_o/Fe_d = atividade dos óxidos de ferro, Ct = caulinita e Gb = gibsitita.

Quadro 2. Teores médios de Ktotal (Ktot), K não-trocável (Knt), K trocável (Kt), K solução (Ksol) e K disponível pelos extratores Mehlich-1 (K-M1) e Resina (K-Res) para quatro solos de várzea após a incubação com calcário, sem aplicação de K

Solo	Ktot	Knt	Kt	Ksol	K-M1	K-Res
	mg dm ⁻³					
OY	9.369,8	95,9 (1,0) ⁽¹⁾	108,3 (1,2)	104,1 (1,1)	136,2 (1,5)	118,5 (1,3)
GM	1.039,8	65,3 (6,3)	115,8 (11,1)	102,6 (9,9)	111,2 (10,7)	105,5 (10,2)
GX	1.123,1	23,6 (2,1)	24,1 (2,2)	36,9 (3,3)	44,5 (4,0)	33,7 (3,0)
RU	8.481,3	237,6 (2,8)	64,7 (0,8)	69,0 (0,8)	90,0 (1,1)	73,0 (0,9)

⁽¹⁾ Número entre parênteses representa a contribuição percentual de cada fração de K para o Ktot.

O coeficiente de atividade (f), para calcular a atividade do K ($a = f \times c_i$), foi determinado pela fórmula de Debye-Huckel, sendo considerados os íons em suas formas livres.

As medidas da relação Q/I de K de cada solo foram determinadas, a partir dos dados das concentrações de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ em cada nível de K usado nas diferentes soluções de equilíbrio com os solos. Por meio de equações ajustadas para cada solo, foi

construída “a curva” que relaciona o ΔK e o QAK e estimaram-se os valores de K em equilíbrio com a solução, K planar, preferencial, poder tampão de K (PTK), quociente de atividade de equilíbrio (QAK_e) e concentração de K na solução do solo (K_e). Os valores de K planar, QAK_e e PTK foram obtidos por meio do ajuste de uma equação de regressão do tipo linear para os pontos obtidos a partir de concentrações crescentes de K na solução inicial e

3 g de solo. O QAKe foi considerado o ponto onde o ΔK foi igual a zero, o K planar como sendo o intercepto da curva ao eixo ΔK , ou seja, quando QAK = 0, e o PTK, pela declividade da reta.

Para obter o K em equilíbrio com a solução, ajustou-se equação de regressão do tipo quadrática aos pontos obtidos sem adição de K na solução inicial e com redução na quantidade de solo (1,5; 0,8; 0,4 e 0,2 g de solo), sendo o valor do K em equilíbrio aquele quando QAK = 0, ou seja, o intercepto da região curva da figura ao eixo ΔK . Pela diferença entre o K planar e o K em equilíbrio com a solução, obteve-se o K preferencial. A concentração de equilíbrio de K na solução do solo foi obtida multiplicando-se o valor de QAKe pela atividade de $(Ca^{2+} + Mg^{2+})^{0.5}$.

Na época do pleno florescimento, amostrou-se uma folha recém-madura de cada planta (4 folhas por vaso), para a determinação dos teores de K no tecido foliar, conforme Malavolta et al. (1997). No final do ciclo, todas as plantas foram colhidas, e os grãos foram secos em estufa a 65–70 °C, para obtenção da matéria seca.

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e estudos de regressão. Pelo ajuste de equações de regressão entre a produção de grãos e as saturações por K da CTC potencial estabelecidas nos tratamentos, foram estimadas as saturações por K necessárias para atingir a produção máxima e para atingir 90 % da produção máxima em cada solo. Substituindo esses valores nas equações que relacionam o K disponível nos solos pelos extratores Mehlich-1 e resina, conforme as saturações por K estabelecidas nos tratamentos, estimaram-se os níveis críticos inferiores de K disponível para 90 % da produção máxima para os diferentes solos. Da mesma maneira, estimaram-se os níveis críticos inferiores de K nos tecidos das folhas do feijoeiro, coletadas na época do florescimento, pela substituição das saturações por K para 90 % da produção máxima de grãos, nas equações de regressão que relacionaram as saturações por K com os teores de K nas folhas do feijoeiro na época do florescimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação ao K total (Ktot), observa-se que os teores diferiram entre os solos estudados (Quadro 2), variando de 1.039,8 mg dm⁻³, no Gleissolo Melânico (GM), a 9.369,8 mg dm⁻³, no Organossolo Mésico (OY). Prezotti & Defelipo (1987), trabalhando com várias classes de solos do estado de Minas Gerais, também encontraram uma ampla variação para os teores de K total.

Exceto para o Neossolo Flúvico (RU), em que o K não-trocável (Knt) foi a fração que mais contribuiu para o Ktot, os teores mais elevados de Ktot parecem

estar ligados aos teores mais elevados da fração trocável e disponível. No entanto, para o solo GM e GX, a participação elevada das formas de K mais prontamente disponíveis (K trocável e disponível) para o Ktot não indica elevados teores do nutriente no solo, pois, na verdade, esta contribuição está relacionada com os teores relativamente baixos obtidos para o Ktot desses solos (Quadro 2).

Para o Knt, observaram-se grandes diferenças entre os solos, sendo os maiores valores observados para os solos OY e RU, mostrando, neste caso, que esta forma de reserva de K está relacionada com os teores mais elevados de silte (Quadro 1) e com o Ktot (Quadro 2) desses solos. Deve-se ressaltar que, nos solos OY, GM e GX, a fração não-trocável de K é até mesmo inferior àquela trocável, indicando que a extração com HNO₃ 1 mol L⁻¹ a quente pode não ser o melhor método para avaliar a reserva de K em certos solos. Esse comportamento provavelmente é um dos motivos pelo qual a classificação do K do solo em trocável e não-trocável, em determinadas situações, não se tem mostrado adequada (Silva et al., 2000).

A menor capacidade de extração de K pelo HNO₃ 1 mol L⁻¹ a quente em comparação ao acetato de amônio pode estar relacionada com a presença de micas resistentes ao intemperismo na fração argila de alguns solos. Conforme Rich (1968), estas micas podem no processo de intemperização conter ilhas de hidróxi-Al entrecamadas, que, sob condições de pH mais elevado, como no caso do acetato de amônio, são precipitadas, ocorrendo assim a extração do K presente nas entrecamadas.

Os quatro solos apresentaram teores de K na solução (Ksol) acima de 11,7 mg dm⁻³ (Quadro 2), teores estes considerados como suficiente para o desenvolvimento vegetal (Raij, 1981). Por outro lado, com exceção do GM, a baixa CTC efetiva dos solos (Quadro 1) favorece a manutenção de teores de K na solução do solo bastante superiores àquela considerado ideal, como pode ser observado pela significativa participação dessa fração para o Ktot, principalmente para os solos GM e GX. No entanto, graças a baixa CTC do solo GX (Quadro 1), esse apresenta maior susceptibilidade às perdas de K por lixiviação em relação aos demais.

Os valores de K disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina foram muito próximos (Quadro 2), apresentando um coeficiente de correlação (r) de 0,99 (P < 0,01) para os solos em estudo. Esses resultados mostram que o K ocupa, no complexo, posição de troca acessível aos dois extratores testados. Se o teor de K disponível acima de 70 mg dm⁻³ pelo Mehlich-1 for considerado como bom para a maioria das culturas (CFSEMG, 1999), apenas o GX apresentaria teores de K em teor abaixo do adequado (Quadro 2). Isto porque esse solo apresenta baixa CTC efetiva e baixos teores de silte

e argila (Quadro 1), os quais influenciam os teores disponíveis e trocáveis desse nutriente.

Para as medidas da relação Q/I (Quadro 3), verifica-se que o solo GX apresentou praticamente todo o seu K sujeito a entrar em equilíbrio com a solução (K planar + K preferencial), adsorvido na posição preferencial de adsorção (K preferencial), o que explica seu menor teor de K em solução (Quadro 2), uma vez que o K adsorvido na posição planar (K planar) é responsável imediato pela manutenção do K em solução. Já os solos OY e GM apresentaram teores praticamente semelhantes de K sujeito a entrar em equilíbrio com a solução, no entanto, o solo OY apresentou maior teor de K planar. Dessa forma, embora os teores de K na solução do solo sejam praticamente semelhantes (Quadro 2), com o esgotamento dessa forma de K pelo cultivo ou por lixiviação, o solo OY manterá maior teor de K em solução do solo em relação ao GM, corroborando os valores de Ke para essa afirmativa.

O conhecimento do teor de K adsorvido na posição planar ou na posição preferencial é de grande importância, quando são feitas comparações dos solos em relação à disponibilidade de K para as culturas. Tomando por base apenas os teores de K trocável determinados pelos métodos tradicionais, quanto maior o teor de K trocável no solo, mais K será mantido na solução do solo. No entanto, tal afirmativa nem sempre será verdadeira, considerando a posição em que se encontra o K sujeito a equilíbrio (Chaves & Kinjo 1987).

Os menores valores de atividade de equilíbrio (QAKe) e de atividade de K na solução do solo (Ke) foram observados para o solo GX (Quadro 3). Além disso, pode-se constatar que esse solo tem um menor poder tampão de K (PTK) em relação aos demais solos, o que é conferido pelos seus teores mais baixos de K trocável e em solução (Quadro 2) que se encontram em equilíbrio dinâmico. Portanto, as adubações potássicas nesse solo deverão ser feitas em doses menores e mais frequentes de forma a minimizar as perdas de K por lixiviação e, até mesmo, o consumo de luxo pelas plantas. Por outro lado, para o solo GM, que apresenta o maior PTK,

as adubações poderão ser feitas em doses maiores e mais espaçadas, visto que possui maior capacidade de manter a atividade de K em solução.

O solo OY, embora apresente maior teor de K planar (Quadro 3) e um teor de K em solução praticamente semelhante à do GM (Quadro 2), apresenta menor poder tampão, indicando que, se o K for absorvido da solução do solo pelas plantas a médios e longos prazos, a capacidade de repô-lo será reduzida, de modo que, se nenhuma aplicação for feita, os cultivos sucessivos poderão sofrer deficiência deste nutriente.

Portanto, os solos estudados diferem quanto à capacidade de fornecer K às plantas e requerem técnicas distintas com relação ao manejo da adubação com esse nutriente. Fica evidente, deste modo, a importância da adoção de práticas que visem aumentar a capacidade de retenção de K nesses solos.

Com o aumento das doses de K estabelecidas nos tratamentos de saturação, de maneira geral, aumentaram também os teores de K de todas as formas avaliadas (Quadro 4). Com relação ao K trocável, como já era esperado, os maiores teores foram encontrados para os solos OY e GX que mostram CTC potencial mais elevada (Quadro 1), pois estes necessitam de maior quantidade de K para atingir a mesma saturação por este nutriente. Os teores de K na solução (Ksol) dos solos apresentaram a mesma tendência observada para K trocável.

Observou-se que, em todos os solos estudados, a quantidade de K liberada durante o cultivo do feijoeiro para alguns níveis de saturação não foi suficiente para atender à demanda por K da planta (Quadro 5), ocasionando, deste modo, maior quantidade absorvida do que liberada, provavelmente, graças à participação de formas de K não extraídas pelo HNO₃ (Nachtigall & Vahl, 1989; Silva et al., 2000).

Pela correlação positiva obtida entre o K trocável inicial e o K trocável liberado (Quadro 6), verificou-se que, quanto maior o teor inicial de K trocável, maior foi sua disponibilidade para as plantas. Considerações semelhantes foram feitas ao K não-trocável inicial que

Quadro 3. Potássio sujeito ao equilíbrio (Kse), planar (K planar) e preferencial (K pref), quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), concentração de equilíbrio de K na solução do solo (Ke) e poder tampão de K (PTK) de quatro solos de várzea

Solo	Kse	K planar	K pref	QAKe	Ke	PTK
	mmol kg ⁻¹			(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	mmol L ⁻¹	(mmol kg ⁻¹)/(mmol L ⁻¹) ^{0,5}
OY	7,3	4,1	3,2	0,65	0,77	6,3
GM	7,7	3,8	3,9	0,35	0,43	11,0
GX	2,5	0,6	1,9	0,13	0,17	4,2
RU	6,0	2,1	3,9	0,21	0,31	9,9

Quadro 4. Teores médios de Ktotal (Ktot), K não-trocável (Knt), K trocável (Kt), K solução (Ksol), K Mehlich-1 (K-M1) e K Resina (K-Res) antes do cultivo do feijoeiro em cinco níveis de saturação por K da CTC potencial de quatro solos de várzea

Solo	Tratamento	Ktot	Knt	Kt	Ksol	K-M1	K-Res
	%	mg dm ⁻³					
OY	0	9.369,8	95,9	108,3	104,1	136,2	118,5
	4	9.203,2	98,6	138,8	119,1	158,0	147,7
	6	9.578,1	131,3	198,4	177,3	218,7	209,2
	8	9.911,3	163,5	251,0	230,4	278,2	292,0
	10	10.119,5	215,2	305,1	275,2	338,0	372,5
GM	0	1.039,8	65,3	115,8	102,6	111,2	105,5
	4	1.289,7	94,9	180,4	170,6	166,5	169,7
	6	1.373,0	164,7	270,5	212,4	244,7	259,0
	8	1.456,3	221,1	369,7	265,5	331,7	350,2
	10	1.581,3	246,0	473,3	408,8	399,2	434,5
GX	0	1.123,1	23,6	24,1	36,9	44,5	33,7
	4	1.317,5	39,6	48,2	51,8	87,7	76,5
	6	1.484,1	51,4	70,7	76,5	132,5	115,0
	8	1.456,3	57,8	88,7	106,4	167,2	149,5
	10	1.456,3	79,3	124,8	139,2	223,7	268,2
RU	0	8.481,3	237,6	64,7	69,0	90,0	73,0
	4	8.203,6	281,4	96,3	98,1	137,2	113,5
	6	8.037,0	274,4	144,3	140,7	193,7	178,7
	8	8.536,8	285,1	189,4	180,3	245,2	220,7
	10	8.453,5	322,0	246,5	197,5	294,7	268,2

Quadro 5. Teores médios de K trocável e não-trocável após o cultivo do feijoeiro, quantidades de potássio liberadas e absorvidas durante o experimento, considerando a saturação por K

Solo	Saturação de K	Final	Liberado	Final	Liberado	K total liberado	K absorvido
	%	mg dm ⁻³	mg vaso ⁻¹	mg dm ⁻³	mg vaso ⁻¹		
OY	Natural	24,6 (77) ⁽¹⁾	251,0	63,0 (34) ⁽¹⁾	98,6	349,6	428,4 (122) ⁽²⁾
	4	38,3 (72)	301,6	63,1 (36)	106,6	408,2	471,4 (115)
	6	48,1 (76)	450,9	71,2 (46)	179,0	624,9	656,9 (104)
	8	71,2 (71)	539,2	62,4 (62)	303,1	842,3	790,4 (94)
	10	104,2 (66)	602,6	67,4 (69)	443,5	1046,1	869,4 (83)
GM	Natural	36,2 (69)	238,8	16,0 (76)	147,9	386,7	357,8 (92)
	4	42,1 (77)	414,7	22,2 (77)	218,4	633,1	716,9 (113)
	6	76,2 (72)	583,1	40,0 (76)	377,0	960,1	1033,9 (107)
	8	89,5 (76)	840,5	48,9 (78)	516,6	1357,1	1293,5 (95)
	10	134,2 (72)	1017,4	110,9 (55)	405,1	1422,5	1402,9 (98)
GX	Natural	11,4 (53)	38,3	16,9 (28)	20,3	55,2	152,8 (277)
	4	14,8 (69)	100,2	20,0 (49)	59,0	159,2	260,7 (163)
	6	23,2 (67)	142,5	18,0 (65)	100,0	242,5	304,0 (125)
	8	35,6 (60)	159,5	11,1 (81)	140,1	299,6	437,6 (146)
	10	46,4 (63)	235,3	23,5 (70)	167,5	402,8	536,1 (133)
RU	Natural	20,8 (68)	131,9	176,1 (26)	184,7	316,6	241,2 (76)
	4	32,4 (66)	191,5	175,4 (38)	318,1	509,6	377,3 (74)
	6	45,6 (68)	296,0	177,0 (36)	292,2	588,2	531,3 (90)
	8	53,0 (72)	409,1	188,2 (34)	290,5	699,6	751,2 (107)
	10	62,8 (75)	550,9	204,9 (36)	351,3	902,2	829,0 (92)

⁽¹⁾ Número entre parênteses representa a redução do K inicial em percentagem com o cultivo. ⁽²⁾ Número entre parênteses representa a percentagem do K absorvido em relação ao K liberado total.

também se correlacionou positivamente com a quantidade de K não-trocável liberada (Quadro 6).

Quanto à produção do feijoeiro, observou-se grande variação dos valores estimados para a saturação por K, entre os solos (Quadro 7). Para 90 % da produção máxima, a menor saturação por K observada para o solo GM, de 4,1 %, foi justificada pelos maiores incrementos na produção com as primeiras doses de K (saturações), o que resultou num ajuste do modelo raiz quadrática aos dados. Da mesma maneira, justificou-se o alto valor para a saturação de K no solo GX, de 8,7 %, em decorrência do ajuste linear dos dados (Quadro 7).

Para a obtenção de 90 % da produção máxima, os teores de K disponível, tanto pelos extratores Mehlich-1 quanto pela Resina, não apresentaram grande variação entre os solos (Quadro 8). No entanto, para esse mesmo nível de produção, as saturações por K da CTC potencial variaram proporcionalmente, mais de 4,1 a 8,7 % (Quadro 7), bem como as doses de K aplicadas para atingir essas saturações, 83 a 155 mg dm⁻³ (Quadro 9). Assim, a recomendação de adubação potássica, objetivando atingir determinada faixa de saturação da CTC pelo nutriente, não pode ser generalizada. Neste caso, seria necessário estabelecer classes de valores de CTC, com recomendação específica de adubação

potássica para cada classe, visando atingir os valores ideais de saturação por K para determinada cultura.

As plantas de feijoeiro apresentaram maior nível crítico de K, quando cultivadas no solo GM (Quadro 10), que dispõe do maior poder tampão desse elemento (Quadro 3). Para o P, segundo Muniz et al. (1985), a facilidade de absorção do nutriente da solução que está em equilíbrio com a forma lábil, pelas plantas, é negativamente relacionada com o poder tampão deste elemento no solo. Desse modo, em solos com maior poder tampão, há uma menor absorção de P pelas plantas. Do mesmo modo que, segundo Holford & Mattingly (1976), em solos com o mesmo fator intensidade, as plantas absorvem P em quantidade diretamente proporcional ao fator capacidade de P do solo, em virtude do maior poder de reposição do P à solução, em consequência da absorção pelas raízes. Então, de forma semelhante, o maior nível crítico de K observado nas plantas cultivadas no solo GM pode ser explicado pelo fato de o solo necessitar de maior quantidade de K para saturar o complexo de troca, daí a maior capacidade de repor o K na solução quando este é absorvido. Assim sendo, as plantas cultivadas no GM em relação às cultivadas nos demais solos tinham, durante todo o período de cultivo, maior disponibilidade de K, o que justifica o maior nível crítico.

Quadro 6. Coeficientes de correlação entre potássio trocável (Kt) inicial, final e liberado; potássio não-trocável (Knt) inicial, final e liberado; potássio absorvido (K abs) e matéria seca de grãos (MSGR)

	Kt inicial	Kt final	Kt liberado	Knt inicial	Knt final	Knt liberado	K Abs	MSGR
Kt inicial	-	0,97**	0,99**	0,52**	0,16ns	0,85**	0,87**	0,79**
Kt final	-	-	0,95**	0,50**	0,14ns	0,84**	0,87**	0,72**
Kt liberado	-	-	-	0,51**	0,16ns	0,84**	0,86**	0,81**
Knt inicial	-	-	-	-	0,90**	0,76**	0,52**	0,28ns
Knt final	-	-	-	-	-	0,40*	0,21ns	-0,04ns
Knt liberado	-	-	-	-	-	-	0,78**	0,64**
K abs.	-	-	-	-	-	-	-	0,80**

** , * e ns significativo a 1, 5 % e não significativo, respectivamente.

Quadro 7. Equações de regressão ajustadas para a matéria seca de grãos (y em g vaso⁻¹), considerando a saturação por potássio (x em %) e estimativas de 90 % da matéria seca e as saturações por potássio estimadas para promover essas produções

Solo	Equação	R ²	MSGR (g vaso ⁻¹)		Saturação por K (%)	
			90 %	Máxima	90 %	Máxima
OY	$\hat{y} = -7,4913 + 10,7661**x - 0,7662**x^2$	0,94	27,3	30,3	5,0 (71) ⁽¹⁾	7,0
GM	$\hat{y} = -31,9698 + 47,5491**x^{0.5} - 8,9645**x$	0,90	28,0	31,1	4,1 (59)	7,0
GX	$\hat{y} = 5,5715 + 1,3344**x$	0,91	15,9	17,7	8,7 (87)	10,0
RU	$\hat{y} = 1,0485 + 4,9431**x - 0,3161**x^2$	0,96	18,4	20,4	5,3 (68)	7,8

⁽¹⁾ Percentagem em relação à saturação máxima, necessária para atingir 90 % da máxima produção.

Quadro 8. Equações de regressão ajustadas para o K disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina (y em mg dm⁻³) de acordo com a saturação por K da CTC potencial (x em %)

Solo	Equação	R ²	Teor de K (mg dm ⁻³)	
			90 %	Máxima
Mehlich-1				
OY	$\hat{y} = 37,5525 + 30,0795^{**}x$	0,99	188	248
GM	$\hat{y} = 9,4681 + 39,4170^{**}x$	0,99	171	285
GX	$\hat{y} = 0,6319 + 21,7893^{**}x$	0,99	190	218
RU	$\hat{y} = 28,5234 + 26,9206^{**}x$	0,99	171	238
Resina				
OY	$\hat{y} = -0,8549 + 37,3410^{**}x$	0,99	186	260
GM	$\hat{y} = -9,0236 + 44,5790^{**}x$	0,99	173	303
GX	$\hat{y} = 0,9129 + 19,4469^{**}x$	0,99	170	195
RU	$\hat{y} = 13,3904 + 25,8980^{**}x$	0,99	150	215

** Significativo a 1 %.

Quadro 9. Equações de regressão ajustadas para o K disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina (y em mg dm⁻³) de acordo com as quantidades de K aplicadas aos solos (x em mg dm⁻³)

Solo	Equação	R ²	Dose de K (mg dm ⁻³)	
			90 %	Máxima
Mehlich-1				
OY	$\hat{y} = 137,3640 + 0,7173^{**}x$	0,99	70	154
GM	$\hat{y} = 111,4450 + 0,7199^{**}x$	0,99	83	241
GX	$\hat{y} = 43,6961 + 0,9454^{**}x$	0,99	155	184
RU	$\hat{y} = 91,7121 + 0,7760^{**}x$	0,99	102	180
Resina				
OY	$\hat{y} = 123,0490 + 0,8991^{**}x$	0,99	70	152
GM	$\hat{y} = 106,3070 + 0,8142^{**}x$	0,99	82	241
GX	$\hat{y} = 39,3247 + 0,8440^{**}x$	0,99	155	184
RU	$\hat{y} = 74,2206 + 0,7462^{**}x$	0,99	99	189

** Significativo a 1 %.

Quadro 10. Equações de regressão ajustadas para os teores foliares de K (y em g kg⁻¹) na época do florescimento, como variável dependente das saturações por K estabelecidas nos tratamentos (x em %) e níveis críticos inferiores (para 90 % da MSGR máxima)

Solo	Equação	R ²	Nível crítico inferior (g kg ⁻¹)
OY	$\hat{y} = 11,9835 + 1,1856^{**}x$	0,87	17,9
GM	$\hat{y} = 14,0477 + 4,0131^{**}x$	0,91	30,5
GX	$\hat{y} = 10,5191 + 0,7203^{**}x$	0,81	16,8
RU	$\hat{y} = 2,7478 + 2,2385^{**}x$	0,96	14,6

** Significativo a 1 %.

CONCLUSÕES

1. O Organossolo Mésico, Gleissolo Melânico, Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico diferiram entre si quanto às diferentes formas de K avaliadas. O Organossolo Mésico e Neossolo Flúvico apresentaram maiores teores de K nas formas: total e não-trocável.

2. A forma de K trocável foi a que mais contribuiu para a absorção desse elemento pelo feijoeiro.

3. A produção do feijoeiro foi significativamente aumentada com a aplicação de K, apesar dos teores médios e altos de K disponível nos solos.

4. As saturações críticas por K da capacidade de troca de cátions potencial correspondentes a 90 %

da produção máxima foram de 5,0, 4,1, 8,7 e 5,3 %, para os solos Organossolo Mésico, Gleissolo Melânico, Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico, respectivamente.

5. Os níveis críticos para a concentração de K nos tecidos foliares do feijoeiro na época do florescimento foram de 17,9, 30,5, 16,8 e 14,6 mg dm⁻³, para Organossolo Mésico, Gleissolo Melânico, Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- BECKETT, P.H.T. Studies on soil potassium. II. The "immediated" Q/I relations of labile potassium in the soil. *J. Soil Sci.*, 15:9-23, 1964.
- BECKETT, P.H.T. & NAFADY, M.H.M. Studies on soil potassium. VI. The effect of K-fixation and release on the form of the K:(Ca + Mg) exchange isotherm. *J. Soil Sci.*, 18:244-262, 1967.
- CHAVES, L.H.G. & KINJO, T. Relação quantidade/intensidade de potássio em solos do trópico semi-árido brasileiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:257-261, 1987.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa, 1999. 359p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos e análises de solos, 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1)
- GIANELO, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas e físicas do solo que afetam a absorção de potássio por plantas de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:109-114, 1981.
- GOEDERT, W.J.; SYER, J.K. & COREY, R.B. Relações quantidade - intensidade de potássio em solo do Rio Grande do Sul. *Pesq. Agropec. Bras.*, 10:31-35, 1975.
- HOLFORD, I.C.P. & MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphorus. *Plant Soil*, 44:377-389, 1976.
- KNUDSEN, D.; PETERSON, G.A. & PRATT, P.F. Lithium, sodium and potassium. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis; chemical and microbiological properties*. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.225-246.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319p.
- MIELNICZUK, J. O potássio no solo. Piracicaba, Instituto de Potassa e do Fósforo, 1978. 80p. (Boletim Técnico, 2)
- MIELNICZUK, J. Avaliação da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração, experiências brasileiras. In: YAMADA, T.; MUZZILLI, O. & USHERWOOD, N.R., eds. *Potássio na agricultura brasileira*. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fósforo. Instituto Internacional da Potassa, 1982. p.289-303.
- MIELNICZUK, J. & SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:115-120, 1978.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:237-243, 1985.
- NACHTIGALL, G.R. & VAHL, L.C. Formas de potássio em solos da região sul do Estado do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:7-12, 1989.
- PREZOTTI, L.C. & DEFELIPO, B.V. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:109-114, 1987.
- RAIJ, B.van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fósforo - Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargil, 1987. 170p.
- REITEMEIER, R.F. The chemistry of soil potassium. *Adv. Agron.*, 3:133-164, 1951.
- RICH, C.I. Mineralogy of soil potassium. In: KILMER, V.J.; YOUNTS, S.E. & BRADY, N.C., eds. *The role of potassium in agriculture*. Madison, Soil Science Society of American, 1968. p.79-108.
- SILVA, I.R.; FURTINI NETO, A.E.; FERNANDES, L.A.; CURI, N. & VALE, F.R. Formas, relação quantidade/ intensidade e biodisponibilidade de potássio em diferentes Latossolos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2065-2073, 2000.
- SPARKS, D.L. Chemistry of soil potassium in Atlantic Coastal Plain soils: a review. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 11:435-449, 1980.
- TISDALE, S.L. & NELSON, W.L. *Soil fertility and fertilizers*. 5.ed. New York, Macmillan, 1993. 634p.