

Capítulo

3

Vinicius de Melo Benites¹
Maria da Conceição S.
Carvalho²
Alvaro Vilela Resende³
José Carlos Polidoro⁴
Alberto C. C. Bernardi⁴
Fábio Álvares de Oliveira⁵

POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO

RESUMO

Cálcio, magnésio e potássio são os metais alcalinos considerados macronutrientes para plantas e, em suas formas catiônicas, representam as bases trocáveis que ocupam a maior parte do complexo de troca dos solos agrícolas. Esses nutrientes são constituintes de minerais primários e suas formas e quantidades disponíveis para as plantas resultam do material de origem e do processo de intemperismo para a formação dos solos. Diferentes aspectos relacionados à mobilidade desses nutrientes no solo e na planta, assim como mecanismos de absorção pelas raízes, auxiliam a decidir sobre as melhores estratégias para manter adequada nutrição

¹ Pesquisador, Doutor, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ; e-mail: vinicius@cnps.embrapa.br; polidoro@cnps.embrapa.br

² Pesquisadora, Doutora, Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO; e-mail: conceicao@cnpaf.embrapa.br

³ Pesquisador, Doutor, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG; e-mail: alvaro@cnpms.embrapa.br

⁴ Pesquisador, Doutor, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP; e-mail: alberto@cnpse.embrapa.br

⁵ Pesquisador, Doutor, Embrapa Soja, Londrina, PR; e-mail: falvares@cnpso.embrapa.br

vegetal e minimizar perdas, resultando em maior eficiência de utilização dos nutrientes. Neste capítulo, são abordados os diferentes compartimentos em que esses elementos podem se encontrar no sistema solo-planta e suas formas de saída e entrada no sistema. A relação entre os teores de potássio, cálcio e magnésio na solução do solo, no complexo de troca e em formas de maior estabilidade é discutida em detalhes, com referência a diferentes grupos de trabalho no Brasil e no exterior. Processos como lixiviação e erosão, ciclagem pelas plantas, extração pelas colheitas e reposição via fertilizantes e corretivos são discutidos. A partir do embasamento teórico aqui reunido, são elaboradas recomendações para o uso eficiente e as boas práticas de manejo de potássio, cálcio e magnésio nos agroecossistemas brasileiros.

Palavras-chave: Bases trocáveis. Fertilidade do solo. Macronutrientes catiônicos.

ABSTRACT

POTASSIUM, CALCIUM AND MAGNESIUM

Calcium, magnesium, and potassium are the alkali metals considered macronutrients for plants, which in their cationic forms represent the exchangeable bases that occupy the major part of the exchange complex of soils. These nutrients are components of primary minerals and their forms and amounts available to plants are the result of original material and the weathering process of soil formation. Different aspects of the mobility of these nutrients in the soil and plant, as well as the mechanisms of absorption by the roots, help determine the best strategies to keep adequate crop nutrition and minimize losses, resulting in higher efficiency of nutrient use. In this chapter, we approach the different compartments in which these elements can be found in the soil-plant system and their forms of output and input in this system. The relationship between the levels of potassium, calcium, and magnesium in the soil solution, in the exchange complex, and in more stable forms is discussed in details, with reference to various groups that work in Brazil and abroad. Processes such as leaching and erosion, recycling by cover plants, extraction by crops, and replenishment through fertilization and liming are discussed. Based on theoretical knowledge, we establish recommendations for the efficient use and good management practices of potassium, calcium, and magnesium in Brazilian agroecosystems.

Key words: Cationic macronutrients. Exchangeable bases. Soil fertility.

1 INTRODUÇÃO

Os elementos potássio, cálcio e magnésio são metais alcalinos, considerados macronutrientes essenciais para as plantas. Esses nutrientes se apresentam no complexo de troca (solução do solo e superfície dos colóides) na forma de íons catiônicos, sendo os dois últimos divalentes (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e o primeiro, monovalente (K^+). O raio iônico hidratado desses cátions se distingue da seguinte forma: $\text{K}^+ = 0,53 \text{ nm}$, $\text{Ca}^{2+} = 0,96 \text{ nm}$ e $\text{Mg}^{2+} = 1,08 \text{ nm}$ (TISDALE et al., 1993). A valência e o raio iônico hidratado são as propriedades relacionadas à dinâmica desses íons no solo, definindo a força de atração na superfície dos colóides com carga contrária. Essa força de atração é crescente com a valência do íon; porém, quanto maior o raio iônico hidratado, menor é a força de adsorção e, portanto, maior a mobilidade no solo. Assim, o K^+ é mais móvel por ser monovalente, seguido do Mg^{2+} , por ter raio iônico hidratado maior do que o do Ca^{2+} .

A movimentação do Ca^{2+} e do Mg^{2+} do solo para as raízes das plantas se dá pelo mecanismo de fluxo de massa. No caso do Ca^{2+} , também é importante a interceptação radicular, em decorrência de sua menor mobilidade no solo. O K^+ , por sua vez, realiza a maior parte de sua movimentação por difusão (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Esses mecanismos são determinantes para a nutrição vegetal. Enquanto na maioria dos solos tropicais a abundância natural desses nutrientes se dá na ordem decrescente – $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ –, essa relação se inverte no tecido vegetal, no qual as concentrações de potássio são superiores às de cálcio e magnésio. O potássio é o segundo nutriente mais absorvido pelas plantas cultivadas e a manutenção de teores adequados deste nutriente em solos agrícolas requer especial atenção.

Embora sejam vizinhos próximos na tabela periódica, esses três elementos apresentam diferentes funções na planta. Em linhas gerais, pode-se dizer que o potássio está relacionado à manutenção do equilíbrio osmótico na célula vegetal e ao processo de regulação das trocas gasosas e transpiração via estômatos; o cálcio está fortemente relacionado à integridade das membranas e paredes celulares e ao crescimento de raízes; e o magnésio é o componente central da clorofila, molécula fundamental para a fotossíntese. Além dessas funções, os três elementos são ativadores de uma série de enzimas, algumas delas relacionadas

à absorção de outros nutrientes, com é o caso do magnésio na ativação de enzimas relacionadas ao transporte do fósforo para dentro das células (MARSCHNER, 1995).

Uma diferença fundamental entre esses nutrientes, que influencia a dinâmica de seu fornecimento para as plantas, é sua mobilidade no interior da planta. Enquanto o potássio e o magnésio podem ser translocados facilmente via floema, o cálcio é um elemento de baixa mobilidade dentro da planta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Logo, o potássio e o magnésio absorvidos pelas raízes e acumulados na parte aérea das plantas podem ser remobilizados para atendimento das necessidades nutricionais de tecidos mais jovens, quando houver diminuição de sua disponibilidade na rizosfera. O cálcio, ao contrário, deve estar mais homogêneo distribuído no solo, pois sua deficiência na solução do solo nas regiões meristemáticas das raízes pode representar sérias restrições ao desenvolvimento radicular, uma vez que este nutriente não é redistribuído internamente na planta.

A seguir, são discutidos diferentes tópicos relacionados à disponibilidade desses elementos em solos tropicais e à sua dinâmica no sistema solo-planta, de forma a montar um arcabouço teórico que permita subsidiar recomendações para a boa prática de manejo desses nutrientes em sistemas agrícolas brasileiros.

2 DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO NOS SOLOS BRASILEIROS

O potássio, o cálcio e o magnésio encontrados naturalmente em solos tropicais são resultantes da solubilização de minerais primários ao longo dos processos de formação dos solos. Essa solubilização é resultante do intemperismo e é fortemente dependente do material de origem, do clima, dos organismos, do tempo e do relevo. Em função da grande diversidade geológica e do gradiente latitudinal do Brasil, solos com teores contrastantes desses cátions ocorrem em diferentes ecossistemas. Enquanto em um extremo são encontrados elevados teores de cálcio e magnésio em solos sob clima semiárido, desenvolvidos sobre rochas calcárias, em outro extremo, observam-se teores muito baixos destes elementos, além do potássio, em solos profundos, fortemente intemperizados, desenvolvidos sob clima tropical, a partir de sedimentos detríticos do terciário (Gráfico 1).

Considerando-se que a maior parte da produção agrícola brasileira ocorre em solos intemperizados do bioma Cerrado, a segunda condição é mais representativa dos solos agrícolas brasileiros.

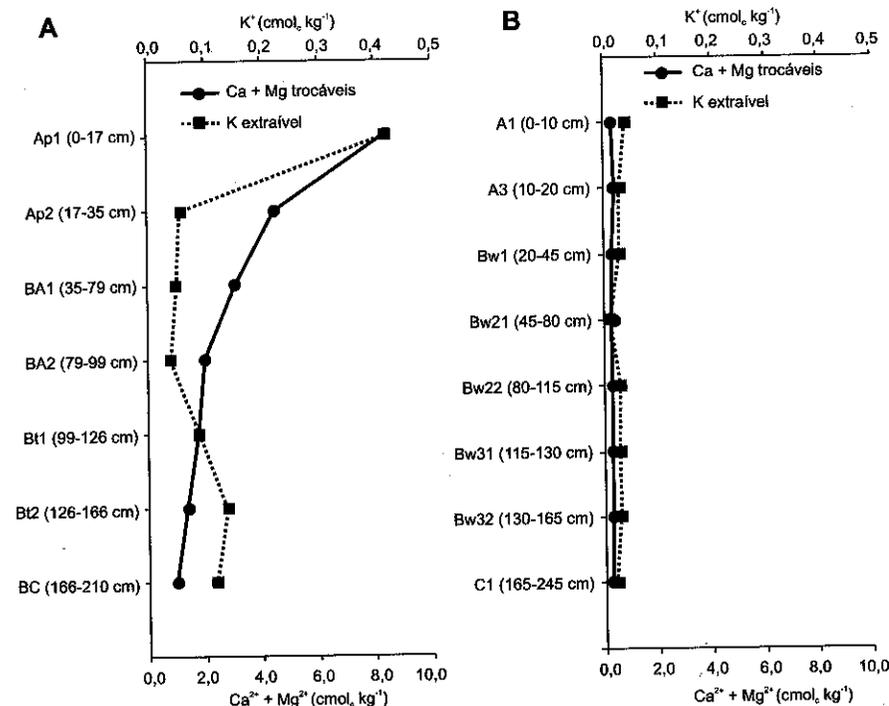


Gráfico 1. Perfis de solos com os teores de Ca + Mg trocáveis e K extraível, sendo **A.** Argissolo Vermelho textura muito argilosa de Criciúma, SC e **B.** Latossolo Vermelho distrófico textura média de Brasília, DF.

Fonte: A. Embrapa (1998); B. Embrapa (1978).

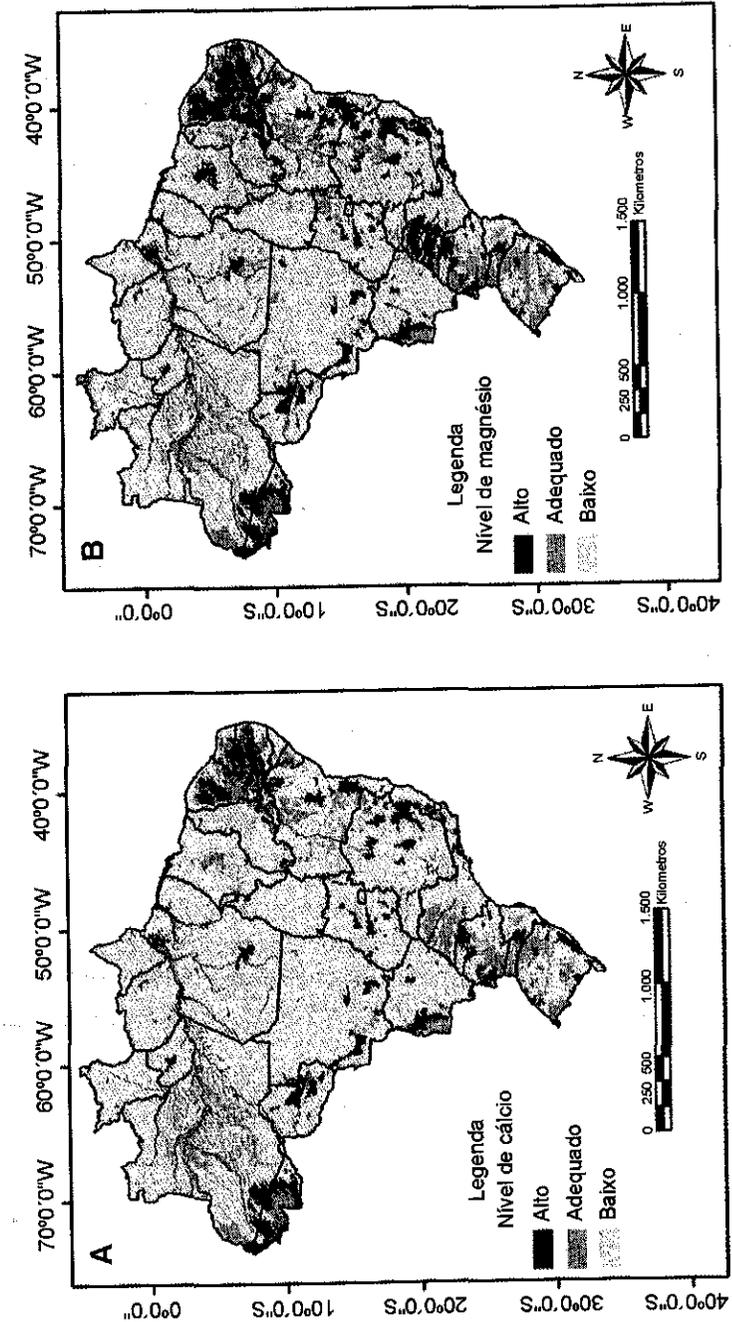
O primeiro passo para a recomendação de boas práticas no uso de nutrientes na agricultura é identificar diferentes condições edáficas e climáticas que justifiquem recomendações específicas. A generalização de práticas agrícolas, desconsiderando as condições de solo e clima, pode resultar em distorções em relação à eficiência do uso de fertilizantes e em perda de produtividade. Em relação à disponibilidade de potássio, cálcio e magnésio, os solos agrícolas devem ser separados em solos com reserva natural suficiente para o desenvolvimento das culturas e solos que

necessitam de complementação nutricional via corretivos e fertilizantes. O ciclo da cultura de interesse (cultivos perenes ou anuais) também influencia na estratégia de fertilização do solo.

A disponibilidade natural de cátions trocáveis no solo, bem como as reservas naturais desses elementos estão associadas à classe predominante de solos em uma dada região e, portanto, os mapas pedológicos permitem um zoneamento dos solos agrícolas quanto à necessidade de complementação nutricional. Em relação ao cálcio, observa-se que solos com elevados teores deste elemento são encontrados nas regiões semiáridas, desenvolvidos sobre depósitos sedimentares andinos (Acre), localizados em várzeas de grandes rios e desenvolvidos sobre rochas calcárias (Mapa 1). Em contraste, os solos com menores teores de cálcio são encontrados na planície amazônica, desenvolvidos sobre sedimentos cauliniticos, e nos Neossolos quartzarênicos e Latossolos de textura média e arenosa do Cerrado. Em áreas sob uso agrícola intensivo, uma proporção significativa dos solos já foi corrigida por meio da calagem, resultando em níveis adequados de cálcio e magnésio.

A distribuição do magnésio em solos brasileiros segue a mesma lógica (Mapa 1). Elevados teores desse elemento podem ser observados em alguns Nitossolos e Latossolos Vermelhos férricos, derivados de rochas ferromagnesianas.

Os solos brasileiros são naturalmente pobres em potássio (Tabela 1), à exceção de alguns da planície litorânea (Luvisolos, Gleisolos e Planossolos), Vertissolos do pampa gaúcho, Neossolos Litólicos originados sobre rochas ricas em minerais potássicos e alguns Nitossolos e Latossolos férricos. Latossolos e Argissolos são geralmente pobres em potássio, sendo os teores médios deste nutriente encontrados em Argissolos superiores aos encontrados em Latossolos. Ao contrário do que se observa em solos de clima temperado, em função da grande quantidade de potássio extraída pela maioria das plantas cultivadas, a reposição deste elemento é fundamental para a manutenção de níveis de produtividade economicamente viáveis em sistemas agrícolas no Brasil. Em outras palavras, pode-se afirmar que os solos tropicais, em sua grande maioria, não possuem reservas de potássio suficientes para sustentar produções agrícolas, nos níveis de produtividade atualmente praticados, sem que seja feita a reposição deste nutriente.



Mapa 1. Níveis naturais de A. cálcio e B. magnésio na forma trocável na camada de 0-30 cm dos solos brasileiros. Fonte: Prado e outros (no prelo).

Tabela 1. Teores de potássio trocável na camada de 0–30 cm de profundidade em perfis representativos de diferentes classes de solos brasileiros.

Classe de solo	Teor de potássio trocável (mg kg ⁻¹)				CV (%)
	Média	Desvio-padrão	Máximo	Mínimo	
Argissolo	79	74	433	4	93
Argissolo Amarelo	37	32	144	11	86
Argissolo Vermelho Amarelo	43	27	90	19	63
Argissolo Vermelho	84	73	398	4	87
Argissolo Acinzentado	70	34	133	35	48
Cambissolo	100	95	647	4	95
Chernossolo	112	66	185	57	59
Espodossolo	18	13	45	8	72
Gleissolo	106	123	671	4	116
Latossolo	60	61	456	4	102
Latossolo Amarelo	31	25	121	8	81
Latossolo Vermelho Amarelo	36	17	66	9	48
Latossolo Vermelho	42	39	226	6	92
Latossolo Bruno	103	70	234	16	68
Luvissolo	160	146	842	23	91
Neossolo Flúvico	108	105	792	16	97
Neossolo Litólico	174	156	761	16	89
Neossolo Quartzarênico	20	17	80	4	83
Nitossolo	135	110	480	12	82
Organossolo	101	54	230	39	53
Planossolo	58	46	226	4	80
Planossolo Hidromórfico	36	32	70	7	88
Plintossolo	50	41	204	4	83
Vertissolo	209	205	780	31	98
Total	82	83	842	4	102

Valores calculados a partir dos perfis inseridos na base de solos da Embrapa Solos, considerando apenas a camada de 0–30 cm.

Fonte: Prado e outros (2008).

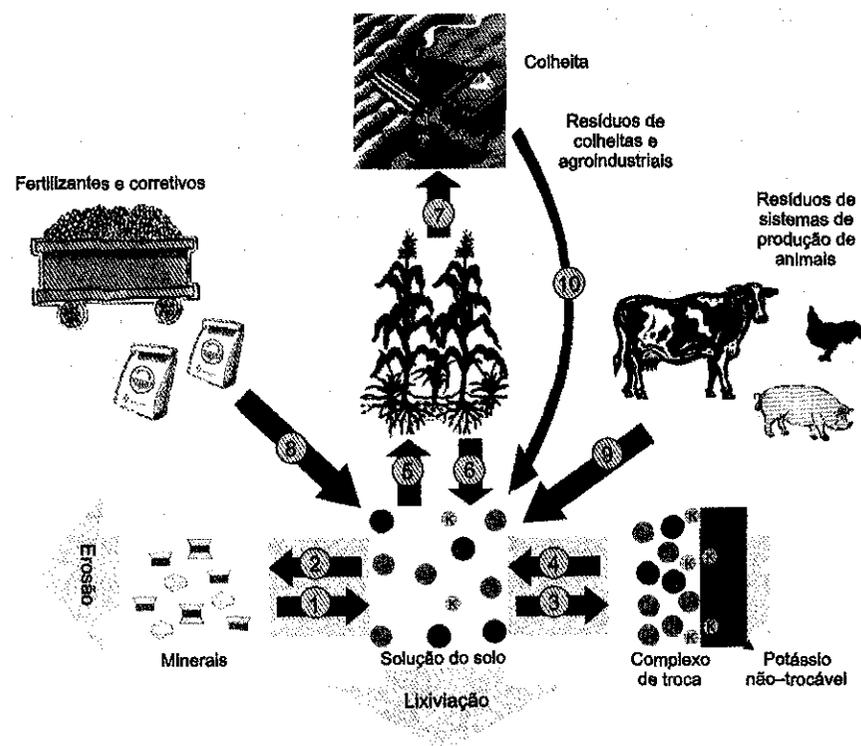
3 DINÂMICA DE POTÁSSIO, CÁLCIO E MAGNÉSIO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

Como bases catiônicas, potássio, cálcio e magnésio apresentam comportamentos muito parecidos no sistema solo–planta. As principais fontes desses nutrientes para a agricultura brasileira são a própria matriz mineral do solo; as adições via corretivos, fertilizantes e resíduos agrícolas e agroindustriais; e os nutrientes reciclados pela cobertura vegetal. As perdas para fora do sistema se dão pelo processo de lixiviação, por erosão ou pela colheita. Logo, boas práticas para a utilização eficiente desses nutrientes envolvem práticas de conservação do solo, como o controle da erosão e o uso de plantas recicladoras, além da reposição, via fertilizantes e corretivos, das quantidades extraídas pelas colheitas.

O Esquema 1 ilustra os principais vetores relacionados ao ciclo desses elementos no sistema solo–planta, sendo cada um desses fatores tratados em detalhe em seguida. No centro do sistema, encontra-se o compartimento que representa a solução do solo. A absorção de potássio, cálcio e magnésio se dá predominantemente a partir da solução do solo e, portanto, os demais compartimentos destes elementos no sistema solo–planta estão diretamente relacionados à sua presença na forma solúvel, reabastecendo a solução do solo à medida que os teores são reduzidos por absorção pelas plantas ou por perdas.

3.1 Reservas de potássio, cálcio e magnésio na forma não-trocável e na forma estrutural nos solos brasileiros

Embora apresentem elevado grau de intemperismo, os solos tropicais normalmente possuem reserva significativa de cátions na forma estrutural em minerais primários e na forma não-trocável (adsorção específica). Em alguns casos, os teores de magnésio e potássio na forma estrutural podem representar mais do que 1,2% e 4,5% da massa total do solo, respectivamente (MELO et al., 2000). As maiores concentrações de potássio e magnésio presentes na forma estrutural em solos brasileiros são encontradas nas frações silte e areia (CASTILHOS et al., 2002; SILVA et al., 1995). Existe uma estreita correlação entre o teor de silte e a capacidade que um solo tem de fornecer potássio da sua reserva estrutural. Contudo, em valores absolutos, em solos argilosos, a fração argila, principalmente na forma de caulinita e de minerais 2:1, pode conter a maior parte do potássio e do magnésio totais de um solo, em especial naqueles mais intemperizados (MELO et al., 2000).



1. Solubilização de minerais; 2. Neogênese; 3. Adsorção de nutrientes no complexo de troca; 4. Dessorção; 5. Absorção de nutrientes pelas raízes; 6. Exsudação radicular; 7. Extração de nutrientes pelas colheitas; 8. Adição de nutrientes via fertilizantes e corretivos; 9. Adição de nutrientes via resíduos da produção animal; 10. Adição de nutrientes via resíduos da colheita e do processamento vegetal.

Esquema 1. Diagrama dos ciclos de potássio, cálcio e magnésio no sistema solo-planta. **Fonte:** Original dos autores.

Solos menos intemperizados apresentam maiores reservas de potássio e magnésio totais em relação aos Latossolos, nos quais esta reserva é muito baixa (MELO et al., 2000). Em ordem de grandeza, os teores de potássio trocável correspondem a valores entre 0,2% e 12% da reserva de potássio na forma total (Tabela 2). Em Latossolos, sobretudo Latossolos Vermelhos, a reserva de potássio na forma total raramente é superior a 50 vezes o teor de potássio trocável, enquanto em solos menos intemperizados ou desenvolvidos a partir de materiais de origem mais ricos, esta relação é normalmente superior a 100:1 (Tabela 2).

Tabela 2. Teores de potássio total, potássio não-trocável, potássio trocável e relação entre potássio não-trocável e trocável em diferentes classes de solos brasileiros.

Classe de solo	Hor ¹	Estado	KT ²		Kt ⁴		Fonte
			(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)	
Gleissolo Háptico	A	RS	5.336	1,3	53,0	1,0	Meurer e Castilhos (2001)
Chernossolo Ebfânico	A	RS	2.189	4,0	59,0	2,7	
Latossolo Vermelho	B	MG	349		14,5	4,2	Melo e outros (2003)
Latossolo Vermelho	B	MG	361		10,8	3,0	
Latossolo Vermelho	B	MG	430		8,9	2,1	
Latossolo Vermelho	B	MG	355		11,3	3,2	
Neossolo Quartzarênico	C	MG	154		2,5	1,6	
Latossolo Vermelho	B	MG	268		4,3	1,6	
Latossolo Vermelho-Amarelo	B	MG	255		7,5	2,9	

Continua

Continuação

Tabela 2. Teores de potássio total, potássio não-trocável, potássio trocável e relação entre potássio não-trocável e trocável em diferentes classes de solos brasileiros.

Classe de solo	Hor ¹	Estado	KT ²		Kt ³		Kt ⁴	Knt/Kt	Fonte
			(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)			
Latossolo Vermelho-Amarelo	B	MG	2.210		17,7	0,8		Melo e outros (2003)	
Latossolo Vermelho	B	MG	206		5,5	2,7			
Latossolo Vermelho	B	MG	268		10,2	3,8			
Nitossolo Vermelho	B	MG	4.735		87,8	1,9			
Nitossolo Vermelho	BC	MG	2.263		90,9	4,0			
Nitossolo Vermelho	B	MG	541		20,5	3,8			
Nitossolo Vermelho	C	MG	425		8,3	2,0			
Argissolo Vermelho Amarelo	B	MG	12.739		98,0	0,8			
Argissolo Vermelho Amarelo	BC	MG	16.938		97,2	0,6			
Argissolo Vermelho	B	MG	10.164		27,8	0,3			
Argissolo Vermelho	B	MG	11.301		21,7	0,2			

Continua

Continuação

Tabela 2. Teores de potássio total, potássio não-trocável, potássio trocável e relação entre potássio não-trocável e trocável em diferentes classes de solos brasileiros.

Classe de solo	Hor ¹	Estado	KT ²		Knt ³		Kt ⁴	Knt/Kt	Fonte	
			(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(%)				
Gleissolo Melânico	A	MG	1.040		65,3	6,3	115,8	11,1	0,6	Villa, Fernandes e Faquin (2004)
Gleissolo Háptico	A	MG	1.123		23,6	2,1	24,1	2,1	1,0	
Organossolo Mésico	A	MG	9.370		95,9	1,0	108,3	1,2	0,9	
Neossolo Flúvico	A	MG	8.481		237,6	2,8	64,7	0,8	3,7	
Argissolo Vermelho	A	RS	1.029		201,0	19,5	46,0	4,5	4,4	Kaminski e outros (2007)
Gleissolo Háptico	A	RS	5.314					44,0	0,8	Castilhos e outros (2002)
Gleissolo Háptico	B	RS	4.408					11,0	0,2	
Planossolo Hidromórfico	A	RS	5.417					31,0	0,6	
Planossolo Hidromórfico	B	RS	5.931					35,0	0,6	
Planossolo Háptico	A	RS	1.944					12,0	0,6	
Planossolo Háptico	B	RS	3.975					25,0	0,6	

Continua

Tabela 2. Teores de potássio total, potássio não-trocável, potássio trocável e relação entre potássio não-trocável e trocável em diferentes classes de solos brasileiros.

Classe de solo	Hor ¹	Estado	KT ² (mg kg ⁻¹)	Knt ³ (mg kg ⁻¹) (%)	Kt ⁴ (mg kg ⁻¹) (%)	Knt/Kt	Fonte		
Chernossolo ebânico	A	RS	2.189	41,0	41,0	1,9			
Chernossolo ebânico	B	RS	3.169	46,0	46,0	1,5			
Vertissolo	A	RS	12.277	1.364,0	11,1	336,0	2,7	4,1	Meurer e Rosso (1997)
Argissolo Vermelho	A	RS	3.015	465,0	15,4	154,0	5,1	3,0	
Latossolo Vermelho	A	RS	1.878	231,0	12,3	224,0	11,9	1,0	

¹ Hor = horizonte.

² KT = teor de potássio total, extraído após digestão ácida com HF, de acordo com Pratt (1973).

³ Knt = teor de potássio não-trocável, extraído por solução HNO₃ 1 mol L⁻¹, de acordo com Pratt (1973).

⁴ Kt = teor de potássio trocável extraído por NH₄OAc, exceto Kaminski e outros (2007), extraído por Mehlich-1, e Melo e outros (2003), extraído por NH₄Ox.

Em relação ao potássio não-trocável, extraído com HNO₃ 1 mol L⁻¹ fervente (PRATT, 1973), os teores encontrados em solos brasileiros se situam normalmente entre uma a três vezes a quantidade de potássio trocável (Tabela 2). Em solos com quantidades expressivas de cátions nas formas não-trocáveis, em especial o potássio, tem-se efeito tampão capaz de manter o teor do elemento disponível adequado ao longo do tempo, não havendo a necessidade de adubações pesadas (KAMINSKI et al., 2007). Logo, para o bom manejo da adubação potássica, os solos que apresentam reserva não-trocável devem ser separados daqueles que não a possuem, como é o caso da maioria dos Latossolos e de solos arenosos fortemente intemperizados.

Os teores de cátions na solução do solo estão em equilíbrio com as formas trocáveis e estas, por sua vez, são constantemente repostas pelos nutrientes contidos nas formas não-trocáveis e pelos nutrientes presentes na forma estrutural em alguns minerais do solo (SPARKS, 1987). A dinâmica de liberação de nutrientes da forma trocável para a solução é bastante rápida, enquanto a liberação de nutrientes das formas não-trocáveis e estruturais se dá de forma mais lenta (MEURER; ROSSO, 1997), podendo não ser rápida o bastante para atender as demandas de culturas anuais.

Formas não-trocáveis de potássio não são detectadas por métodos de extração de rotina, como Mehlich-1 e oxalato de amônio (PAVAN et al., 1992). Contudo, em vários trabalhos conduzidos em solos brasileiros têm sido encontradas quantidades de potássio extraídas pelas plantas cultivadas superiores às quantidades deste elemento extraídas pelos extratores de rotina, sugerindo que parte do potássio não-trocável pode ser absorvida mesmo por culturas anuais (KAMINSKI et al., 2007; ROSOLEM; MACHADO; RIBEIRO, 1988; SILVA et al., 1995).

Segundo Wiethölter (2007), as formas não-trocáveis e estruturais de potássio são importantes para a nutrição de plantas, especialmente se for considerada a absorção deste nutriente nas zonas de depleção da rizosfera ocupadas por pelos radiculares. A absorção de potássio pelas plantas desencadeia um processo contínuo de depleção de formas não-trocáveis ocorrentes no solo, especialmente quando os teores de potássio disponíveis são mais baixos (KAMINSKI et al., 2007). De acordo com a lei do equilíbrio químico, em solos nos quais os teores de nutrientes em solução são altos, sua transferência da forma não-trocável e estrutural

para a solução do solo é minimizada, pois a concentração do nutriente em solução é muito superior à constante de estabilidade do mineral. Dessa forma, para o aproveitamento de parte dos cátions presentes na forma não-trocável, é interessante que se tenha ao longo do ano períodos de depleção parcial dos nutrientes em solução, forçando a liberação das formas não-trocáveis. Isso pode ser conseguido, por exemplo, pela utilização de plantas de cobertura de inverno, não adubadas, em especial gramíneas que tenham grande capacidade de extração e armazenamento de potássio na biomassa. Adiante, será detalhado o potencial de algumas plantas de cobertura na extração de cátions do solo, sobretudo o potássio e a rápida ciclagem deste elemento para as culturas posteriores. Grande parte dos cátions assimilados por essas plantas vem das frações não-trocáveis do solo, uma vez que seu sistema radicular encontra um solo com baixos teores de nutrientes em solução, aumentando o potencial de extração de formas menos disponíveis.

3.2 Teores de potássio, cálcio e magnésio na forma extraível e na solução do solo

Os cátions trocáveis, como potássio, cálcio e magnésio, são assim denominados por estarem adsorvidos eletrostaticamente em cargas negativas na superfície das partículas do solo, podendo ser substituídos por outro cátion existente na solução do solo.

Os teores de cátions trocáveis estão em equilíbrio com os teores de cátions na solução do solo e, assim, quando um deles é removido da solução, por exemplo, por absorção pela planta, pode ocorrer a reposição dos teores trocáveis pela troca com outros cátions na solução (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Contudo, as concentrações de cátions na solução do solo são muito pequenas, da ordem de 0,5 mmol L⁻¹ a 100 mmol L⁻¹ (MENGEL; KIRKBY, 2001), em comparação com os teores trocáveis. Por isso, os teores trocáveis desses cátions no solo são usados para avaliar a sua disponibilidade para as plantas. No caso do potássio, porém, a associação do teor trocável como sendo o teor disponível não é tão simples em solos nos quais as formas não-trocáveis podem se tornar disponíveis.

Conforme Raij (1981), o extrator clássico usado para extrair potássio, cálcio e magnésio trocáveis no solo é o acetato de amônio 1 mol L⁻¹ a pH 7,0. No Brasil, esses cátions têm sido determinados também nos extratos usados para a determinação de fósforo com ácidos diluídos (Mehlich-1),

soluções salinas ou resina trocadora de íons, obtendo-se os mesmos resultados (RAIJ; QUAGGIO; SILVA, 1986). A maioria dos laboratórios de rotina no país utiliza uma solução de KCl 1 mol L⁻¹ para extração de cálcio e magnésio.

A interpretação dos resultados de análise de solo é feita, normalmente, comparando-se os valores obtidos com aqueles sugeridos em tabelas elaboradas regionalmente por comissões de fertilidade do solo ou órgãos oficiais de pesquisa. Essas tabelas de interpretação, muitas vezes, refletem os resultados de longos anos de pesquisas realizadas em uma determinada região, como estudos de calibração ou até mesmo a experiência prática de técnicos locais. Nas tabelas, os teores de nutrientes são classificados em “muito baixos”, “baixos”, “médios”, “adequados/bons”, e “altos”, de acordo com sua influência esperada na produção das culturas. Geralmente, o limite superior da classe de teor “médio” indica o nível crítico (ou teor de suficiência, ou teor crítico), ou seja, o valor abaixo do qual o solo é considerado deficiente para o nutriente em questão. Quando o teor de um determinado nutriente no solo encontra-se acima do nível crítico, não se espera resposta das culturas à sua aplicação, e as adubações devem ser feitas para repor as quantidades exportadas do sistema (colheita, perdas). Contudo, mesmo quando os teores no solo estão altos, é recomendável uma pequena adubação no plantio para homogeneizar o desenvolvimento inicial das plantas e prevenir possíveis variações devido à heterogeneidade espacial da fertilidade do solo que comumente se observa em áreas agrícolas.

Para o potássio, existem muitos trabalhos de pesquisa, sobretudo nas Regiões Sul, Sudeste e no Cerrado do Brasil, relacionando o teor trocável deste nutriente no solo com a produção de diversas culturas (ALVAREZ-VEGAS et al., 1999; BRUNETTO et al., 2005; COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004; RAIJ et al., 1996; SOUSA; LOBATO, 2002), que permitiram o estabelecimento de classes de interpretação de disponibilidade para este nutriente, conforme apresentado na Tabela 3. Nota-se que na região do Cerrado e nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, a capacidade de troca de cátions (CTC) é incluída na interpretação do teor de potássio no solo. No Rio Grande do Sul e Santa Catarina, resultados de pesquisa indicaram que solos com maior poder-tampão para potássio (maior CTC) necessitam de maior quantidade deste elemento para satisfazer a demanda das plantas (SILVA; MEURER, 1988; WIETHÖLTER, 2007).

Tabela 3. Interpretação da análise de solo para potássio nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, bem como na região do Cerrado, para recomendação de adubação, na camada de 0–20 cm de profundidade.

Estado/ Região	CTC a pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	Interpretação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ¹	Adequado/ Bom/Alto	Muito alto/ Muito bom
----- Teor de K no solo (mg dm^{-3}) – Extrator Mehlich-1 -----						
MG ²	< 15	16–40	41–70	71–120	> 120	
Cerrado ³	< 4,0	≤ 15	16–30	31–40	> 40	
	> 4,0	≤ 25	26–50	51–80	> 80	
RS e SC ⁴	≤ 5,0	16–30	31–45	46–90	> 90	
	5,1 a 15	21–40	41–60	61–120	> 120	
	> 15	41–60	61–90	91–180	> 180	
----- Teor de K no solo ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) – Extrator Resina -----						
SP ⁵	≤ 0,07	0,08–0,15	0,16–0,3	0,31–0,6	> 0,6	

¹ O limite superior dessa classe indica o nível crítico.

Fonte: ² Alvarez-Venegas e outros (1999); ³ Sousa e Lobato (2002); ⁴ Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC (2004); ⁵ Raij e outros (1996).

As tabelas de interpretação dos resultados da análise de solo para cálcio, na camada superficial, são bastante contrastantes entre as regiões do Brasil. Para São Paulo, Raij e outros (1996) indicaram a faixa de $0,4 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ a $0,7 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ como teores médios. Já no Cerrado, segundo Sousa e Lobato (2002), os teores considerados adequados estão na faixa de $1,5\text{--}7,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Para o estado de Minas Gerais, Alvarez-Venegas e outros (1999) indicaram a faixa de $1,21\text{--}2,40 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ como teores médios, sendo $1,21 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ considerado como limite crítico, enquanto o intervalo de $2,41\text{--}4,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ é considerado bom. Para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os teores de cálcio entre $2,1 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e $4,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ são dados como médios, sendo considerados deficientes teores abaixo de $2,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004).

Na prática, é difícil isolar o efeito nutricional do cálcio, pois, geralmente, os efeitos da acidez do solo e da pobreza dos demais nutrientes se expressam mais rapidamente do que o de deficiência deste nutriente nas lavouras. Assim, não é comum o aparecimento de sintomas de deficiência de cálcio no campo, uma vez que, com a calagem, as quantidades aplicadas superam, em muito, as necessidades das culturas. De acordo com Raij (1981), os limites de interpretação indicados como médios ou adequados para cálcio, na camada superficial dos solos no Brasil, são muito altos e não correspondem às reais necessidades das plantas, pois possivelmente os teores de cálcio que limitam as produções das culturas sejam até inferiores aos de magnésio. Contudo, maiores cuidados são necessários para algumas culturas mais exigentes em cálcio, tais como tomate, citros, amendoim, maçã, manga, cuja deficiência deste nutriente pode afetar a qualidade do produto.

No caso de subsolo (camada abaixo de 20 cm de profundidade), o teor de cálcio trocável, juntamente com a saturação por alumínio na CTC efetiva, é usado como critério para definir a necessidade de aplicação de gesso. Ritchey, Silva e Costa (1982) demonstraram que a penetração das raízes de trigo, soja e milho em subsolos ácidos altamente intemperizados do Cerrado foi limitada mais pela deficiência de cálcio do que pela toxidez de alumínio. Usando um método biológico, visando estimar a relação entre o crescimento de raízes e o teor de cálcio trocável em solos, Ritchey, Silva e Sousa (1983) verificaram que teores abaixo da faixa de $0,2 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$ a $0,5 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$

impediram o crescimento de raízes de trigo. Por sua vez, Ritchey, Silva e Costa (1982) demonstraram que a adição de apenas $0,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $0,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio no solo na forma de cloreto, fosfato ou carbonato foi suficiente para normalizar o crescimento de raízes de plântulas de trigo, milho e soja em subsolos ácidos do Cerrado. Carvalho e Raij (1997) verificaram que o crescimento de raízes de milho foi afetado no subsolo de um Latossolo Vermelho argiloso com $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio e sem alumínio trocável. No mesmo estudo, a adição no solo do equivalente a $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio na forma de gesso ou de carbonato de cálcio aumentou em 70% o comprimento de raízes de milho.

Em solos de Cerrado, Sousa e Lobato (2002) recomendaram o uso de gesso quando o teor de cálcio nas profundidades de 20–40 cm e de 40–60 cm for inferior a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Já em Minas Gerais (ALVAREZ-VENEGAS et al., 1999) e em São Paulo (RAIJ et al., 1996), considera-se que a aplicação de gesso para promover o crescimento de raízes no subsolo é necessária quando as camadas subsuperficiais do solo (20–40 cm ou 30–60 cm, respectivamente) apresentam cálcio trocável inferior a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Para a classe de teores médios de magnésio em solos da região do Cerrado, Sousa e Lobato (2002) indicaram a faixa de $0,5$ – $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, considerando o teor de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ como limite crítico para a produção das culturas. Em Minas Gerais, a interpretação para o nível crítico de magnésio é $0,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, sendo dados como bons os teores na faixa de $0,91$ – $1,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (ALVAREZ-VENEGAS et al., 1999). Em São Paulo (RAIJ et al., 1996), os teores médios de magnésio recomendados estão entre $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os teores médios de magnésio variam de $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ a $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004). As faixas de valores dentro de uma mesma classe estão associadas, possivelmente, a diferenças na exigência das diversas culturas dentro dos sistemas de produção e ao teor de argila do solo. Solos arenosos dificilmente terão teor de magnésio acima de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e, embora algumas culturas sejam mais exigentes quanto ao teor de magnésio trocável no solo, como o algodoeiro, para a maioria das culturas, um teor de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ seria suficiente, a não ser que ocorram interações com outros cátions que dificultem a sua absorção pela planta, como será abordado no próximo item.

Além dos teores absolutos, os cátions potássio, cálcio e magnésio trocáveis são também expressos como porcentagem de saturação na CTC do solo. Contudo, esse índice tem pouca importância quando comparado aos teores absolutos desses nutrientes. Assim, os resultados de pesquisa têm demonstrado que o teor trocável de potássio ainda é o melhor índice para avaliar a disponibilidade deste nutriente para as plantas, sobretudo quando associado com a CTC do solo (RAIJ, 1981; SOUSA; LOBATO, 2002; WIETHÖLTER, 2007). Sousa e Lobato (2002) recomendaram que, caso se utilize a porcentagem de saturação de potássio na CTC em solos de Cerrado, não seja ultrapassado o limite de 3%, acima do qual há potencial de perdas deste elemento por lixiviação.

Na Tabela 4, são apresentados valores de referência de teores de nutrientes em perfil de solo corrigido até 60 cm de profundidade, sugeridos pelos autores deste capítulo. Embora a porcentagem de saturação de potássio, cálcio e magnésio na CTC do solo tenha menor importância em relação aos teores absolutos destes cátions, optou-se por apresentar esses índices na Tabela 4, porque, de qualquer modo, em um solo bem drenado, esses cátions trocáveis estão retidos no solo, geralmente nesta ordem: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$.

3.3 Relação entre os teores de potássio, cálcio e magnésio em solução e na fração trocável e sua absorção pelas plantas

Embora dependa principalmente da concentração na solução do solo, a absorção de cátions não é exatamente um processo não-específico, pois, em alguns casos, depende da permeabilidade específica da membrana a alguns cátions, também chamada de difusão facilitada (MENGEL; KIRKBY, 2001). No processo de absorção, pode ocorrer competição não-específica entre cátions pelo mesmo sítio de absorção na superfície das raízes. Isso faz com que a velocidade de absorção de um cátion seja diminuída pela presença de outro cátion na solução, que inibe a absorção do primeiro. Essa inibição pode ser revertida aumentando-se a concentração do primeiro cátion na solução e, por isso, é chamada de inibição competitiva (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Uma evidência da competição entre os cátions pela absorção é que a soma total de cátions em uma planta é pouco variável com o incremento no fornecimento de um cátion isolado, pois geralmente ocorre redução na proporção dos outros cátions presentes (MENGEL; KIRKBY, 2001).

Tabela 4. Valores de referência de teores de nutrientes em perfil de solo corrigido para a atividade agrícola.

Profundidade (cm)	Cálcio	Magnésio	Potássio	Soma de bases	(Ca+Mg):K	Ca:Mg
	----- (cmol _c dm ⁻³) -----					
0-10	3,00	1,20	0,25	4,45	16,8	2,5
10-20	1,80	0,80	0,15	2,75	17,3	2,3
20-40	1,20	0,50	0,10	1,80	17,0	2,4
40-60	0,50	0,30	0,05	0,85	16,0	1,7
0-20	2,40	1,00	0,20	3,60	17,0	2,4
% CTC	40%	17%	3%	60%		

Valores de referência para solos com CTC = 6 cmol_c dm⁻³. Em solos com CTC entre 4 cmol_c dm⁻³ e 9 cmol_c dm⁻³, os valores absolutos devem ser ajustados proporcionalmente a este valor. Para solos com CTC acima desse limite, utilizar os valores absolutos calculados para CTC = 9 cmol_c dm⁻³.

Fonte: Original dos autores.

A despeito de sua menor participação no complexo de troca do solo e, conseqüentemente, menor atividade na solução, o potássio se apresenta em maior concentração na planta, em comparação com cálcio e magnésio. Tal fato é forte evidência de que o potássio é absorvido mais rapidamente, ativamente ou por difusão facilitada, e compete fortemente com outros cátions. Desse modo, embora a concentração de cálcio na solução do solo seja dez vezes maior do que a de potássio, sua absorção é usualmente menor do que a de potássio, porque pode ser absorvido apenas por raízes jovens nas quais as paredes celulares da endoderme não estão suberizadas (MENGEL; KIRKBY, 2001).

A competição entre os cátions no processo de absorção pelas plantas tem sido demonstrada em diversas pesquisas em vasos e no campo, onde o excesso de um prejudica a absorção do outro, alterando os teores na planta, embora nem sempre ocorra redução na produção das culturas (MASCARENHAS et al., 2000; MOREIRA; CARVALHO; EVANGELISTA, 1999; OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001; OLIVEIRA; PARRA, 2003; MEDEIROS et al., 2008; ROSOLEM; MACHADO; BRINGHOLI, 1984; VENTURA et al., 1987). Jakobsen (1993) afirmou que a atividade de cátions na solução do solo é influenciada pela concentração de nutrientes na camada trocável e também pela presença de ânions na solução do solo. De acordo com o autor, a aplicação de cloreto de potássio promove aumento momentâneo da absorção de outros cátions, como cálcio e magnésio. Porém, após a lixiviação do cloreto, os elevados teores de potássio residuais podem promover a redução da atividade de cálcio e magnésio em solução, reduzindo sua absorção pelas plantas.

O magnésio é absorvido em menor quantidade do que o cálcio e o potássio e a competição entre estes cátions é especificamente importante para o primeiro, podendo levar à sua deficiência no campo. Em experimentos com sorgo, Rosolem, Machado e Bringholi (1984) indicaram que os teores de magnésio no solo não foram afetados pela aplicação de potássio, mas a absorção de magnésio pelas plantas foi reduzida em presença de elevadas concentrações de potássio. Büll e outros (1993) demonstraram que *Panicum* e soja perene mostraram menor absorção de cálcio e magnésio como consequência do aumento na absorção de potássio e aumento na relação K:(Ca+Mg) no solo. Faquin e outros (1994) verificaram que, em ausência de potássio na adubação, *Panicum* apresentou maior concentração de magnésio no tecido. Em experimento de campo, Silva e outros (1985)

observaram que, em solo originalmente com 31 mg kg^{-1} de potássio e $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de magnésio, a aplicação de 80 kg ha^{-1} de K_2O anualmente provocou redução do teor de magnésio em folhas de plantas de algodão. Carvalho e Barbosa (2003), também em experimento de campo com a cultura do algodão, verificaram que a adubação potássica causou drástica redução do teor de magnésio na folha, de modo que doses de potássio acima de 140 kg ha^{-1} de K_2O reduziram a produtividade desta cultura.

Diante do exposto, uma questão que tem gerado dúvidas entre os profissionais que trabalham com assistência técnica no campo é se há uma relação ideal entre cátions na CTC do solo. É muito comum, também, os laboratórios de análise de solo incluírem os valores das relações Ca:Mg, Ca:K e Mg:K nos resultados das análises, e existe um certo “senso comum” de que a relação Ca:Mg no solo fique em torno de 4.

Para tentar sanar essas dúvidas, vários trabalhos de pesquisa foram conduzidos no Brasil e também no exterior. Em um trabalho de revisão recente, Kopittke e Menzies (2007) analisaram dados de experimentos conduzidos nos Estados Unidos e concluíram que, dentro dos níveis de cátions trocáveis comumente encontrados naqueles solos (níveis adequados), não existe “relação ideal” de saturação entre cátions na CTC do solo e a aplicação deste conceito pode levar ao uso ineficiente de insumos. Contudo, os mesmos autores admitiram que, em certas condições, tem sido observada deficiência de magnésio em animais, mesmo quando os teores deste nutriente no solo são suficientes para o crescimento de plantas. Isso ocorre porque as gramíneas forrageiras possuem menor concentração de magnésio em seu tecido do que as leguminosas, conforme já foi discutido, casos em que é necessária adubação adicional com o nutriente.

Em dois experimentos de campo, conduzidos durante três safras de algodoeiro nos Estados Unidos, em dois solos contendo $0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de magnésio, Stevens e outros (2005) verificaram que a calagem aumentou a produtividade, mas não houve diferença entre os dois tipos de calcário usados (calcítico e dolomítico). No mesmo trabalho, os autores mostraram que a variação da relação Ca:Mg do solo de 2,5:1 até 7,6:1 (em porcentagem da saturação por bases), mantendo constante o pH do solo, não afetou a produtividade e nem a qualidade da fibra.

No Brasil, a maioria dos experimentos acerca das relações entre os cátions cálcio, magnésio e potássio trocáveis e na solução do solo, bem

como de seu efeito na absorção pelas plantas e produção, foi conduzida em casa de vegetação, sob condições controladas, o que dificulta a extrapolação para as condições de campo, em que o volume de solo explorado pelas raízes e a dinâmica de solutos são totalmente alterados.

De modo geral, na maioria dos trabalhos desenvolvidos em solos do Brasil, a variação na saturação por cálcio, magnésio e potássio na CTC do solo não influencia a produção das culturas, desde que os teores trocáveis de cada um deles sejam adequados, o mesmo acontecendo com a relação Ca:Mg (FAGERIA, 2001; OLIVEIRA, E. L., 1993; OLIVEIRA; PARRA, 2003). Nos Estados Unidos, Simson, Corey e Sumner (1979) avaliaram, em experimentos de campo, variações na saturação de cálcio (32% a 68%), magnésio (12% a 35%) e da relação Ca:Mg (2:1 a 8:1) na CTC do solo sobre a produção de alfafa, e verificaram que não houve influência na produtividade, pois os teores trocáveis de cálcio e magnésio estavam acima do nível considerado adequado para a cultura.

Esses resultados permitem afirmar que, se os teores trocáveis de cálcio e magnésio estiverem acima do nível crítico para as espécies cultivadas, uma ampla variação da relação entre eles não influencia na produtividade. A indicação de Sousa e Lobato (2002) para a região do Cerrado é que a relação entre os teores de cálcio e magnésio no solo, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, pode situar-se entre 1:1 até o máximo de 10:1, se o teor de magnésio no solo for superior a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Na recomendação de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004), admite-se que a maior parte das culturas não é afetada pela relação Ca:Mg variando de 0,5:1 a mais de 10:1; porém recomenda-se que esta relação fique entre 3:1 e 5:1 para o cultivo de culturas mais exigentes, como citros e macieira.

No Brasil, tem havido interesse em avaliar a relação (Ca+Mg):K e os trabalhos de pesquisa demonstram que as melhores respostas das culturas ocorrem quando esta encontra-se na faixa de 12:1 a 31:1 (LIMA et al., 1981; MASCARENHAS et al., 1987; MASCARENHAS et al., 2000; OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001) e os teores desses cátions trocáveis no solo encontram-se acima do nível crítico. Decréscimos na produção ocorrem, geralmente, quando a relação (Ca+Mg):K é superior a 30:1, situação em que, muitas vezes, o teor de potássio no solo está abaixo de $0,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que provoca a redução da absorção deste

nutriente pelas plantas (ANDREOTTI et al., 2001; BÜLL; VILLAS BÔAS; NAKAGAWA, 1998; CARVALHO; BERNARDI; FERREIRA, 2005; OLIVEIRA; CARMELLO; MASCARENHAS, 2001; SILVA et al., 1985).

Assim, concordando com a opinião de Raij (1981), os resultados de pesquisas indicam que o teor de potássio trocável deve ser usado como índice básico para avaliar a disponibilidade deste nutriente, mas é importante considerar, também, a relação com cálcio e magnésio como índice secundário, que pode indicar certo grau de disponibilidade variável, de acordo com os teores trocáveis desses cátions no solo.

3.4 Perdas de potássio, cálcio e magnésio por lixiviação e erosão

Além das retiradas de potássio, cálcio e magnésio pelas colheitas, o solo pode ser empobrecido pelos processos de lixiviação e erosão. Diferentemente do que ocorre com outros nutrientes, como nitrogênio e enxofre, que podem ser perdidos por volatilização, ou fósforo, que pode ficar indisponibilizado pela fixação, potássio, cálcio e magnésio não apresentam formas voláteis e os mecanismos de adsorção específica são pouco significativos em solos tropicais. Logo, o uso eficiente desses nutrientes em sistemas agrícolas tropicais envolve práticas de manejo conservacionista do solo, porquanto a erosão e a lixiviação devem ser minimizadas.

Para que os nutrientes sejam perdidos por lixiviação, é necessário que estejam na forma solúvel, ou seja, que façam parte da solução do solo. Quanto maior a concentração dos nutrientes na solução do solo, maior a chance de serem perdidos por lixiviação (ISHIGURO; SONG; YUITA, 1992). Uma vez em solução, a mobilidade vertical desses nutrientes no solo depende de fatores físicos e químicos, os quais estão relacionados à capacidade do solo de interagir com os nutrientes da água percolada. Entre esses fatores, estão: a condutividade hídrica do solo e a distribuição relativa do tamanho de poros (DIEROLF; ARYA; YOST, 1997); o pH (ERNANI; SANGOI; RAMPAZZO, 2002), que por sua vez está associado à capacidade de troca catiônica (SANZONOWICZ; MIELNICZUK, 1985); e a concentração e espécie de ânions acompanhantes, que estão relacionados à força iônica e à formação de pares iônicos (FIGUEIREDO, 2006).

O movimento radial de potássio no solo ocorre preferencialmente por difusão e em menor proporção por fluxo de massa (ARAÚJO et al., 2000; OLIVEIRA; ROSOLEM; TRIGUEIRO, 2004), enquanto o

movimento de cálcio e magnésio ocorre preferencialmente por fluxo de massa (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Contudo, o movimento vertical desses três elementos ocorre fundamentalmente por fluxo de massa (ERNANI et al., 2007). Em solos nos quais há predomínio do fluxo hídrico por macroporos em relação aos microporos, o potássio pode ser transportado abaixo do alcance das raízes, caracterizando o processo de lixiviação (QUAGGIO; MASCARENHAS; BATAGLIA, 1982; SANZONOWICZ; MIELCNIZUK, 1985). Ao contrário do que se observa com o nitrato, não há relatos de contaminação de lençóis freáticos pela lixiviação de potássio, embora possíveis perdas por lixiviação deste nutriente, em condições bem particulares, possam resultar em prejuízos econômicos para o produtor (JOHNSTON, 2007). Em relação ao cálcio, o aumento da mobilidade vertical é desejável, uma vez que a presença deste elemento nas camadas subsuperficiais do solo é fundamental para a promoção do crescimento radicular.

A maioria dos estudos de lixiviação realizados com solos tropicais foi conduzida em ambientes controlados, em colunas preenchidas com amostras desagregadas (ERNANI et al., 2007; MARIA et al., 1993; WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008). Essa metodologia causa aumento da taxa de infiltração de água no solo, aumentando o transporte por fluxo de massa, superdimensionando a quantidade de cátions no lixiviado, sobretudo o potássio (ERNANI et al., 2007). Em condições de campo, em especial em solos de textura mais fina, sob plantio direto, nos quais a estrutura é preservada, o transporte por difusão ganha importância em relação ao transporte por fluxo de massa, o que reduz as perdas relativas de potássio em comparação a cálcio e magnésio.

Em solos fertilizados com cloreto de potássio, Ernani e outros (2007) relataram perdas de potássio de 3,6 kg ha⁻¹ a 18,0 kg ha⁻¹, representando de 1% a 4% do potássio aplicado. A aplicação de cloreto de potássio também promoveu aumento das concentrações de cálcio e magnésio na solução do solo, em decorrência do seu deslocamento dos sítios de troca pelo K⁺ e da maior movimentação vertical desses cátions, sendo lixiviados 23 kg ha⁻¹ a 46 kg ha⁻¹ de cálcio e 7 kg ha⁻¹ a 34 kg ha⁻¹ de magnésio. Em solos de Cerrado, com a fertilidade corrigida, em um experimento com lisímetros, Menezes, Benites e Oliveira (no prelo) encontraram no lixiviado 25,1 kg ha⁻¹ de cálcio, 10,8 kg ha⁻¹ de magnésio e 3,2 kg ha⁻¹ de potássio, ao longo de um ciclo de cultivo de soja. As perdas de potássio significaram cerca de

4% do aplicado na forma de cloreto. Em geral, os valores lixiviados são proporcionais às concentrações dos elementos normalmente encontradas na solução do solo.

Assim como a aplicação de cloreto influencia a mobilidade vertical de cálcio e magnésio, a aplicação de gesso aumenta a mobilidade vertical de potássio, cálcio e magnésio (MARIA et al., 1993; PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1984). A utilização de gesso é a principal estratégia recomendada para fornecimento de cálcio em subsuperfície em sistema plantio direto. Embora a aplicação de gesso influencie a mobilidade vertical de potássio, não há evidência a campo de que este efeito resulte em lixiviação significativa deste elemento.

A forma de aplicação dos corretivos e fertilizantes também influencia a mobilidade vertical de potássio, cálcio e magnésio, podendo potencializar sua lixiviação. A incorporação de cloreto de potássio resulta em maior lixiviação de potássio comparada a tratamentos com aplicação superficial (ERNANI et al., 2007). A incorporação de calcário permite maior movimentação vertical dos três elementos do que a aplicação superficial (QUAGGIO, 2000).

Por outro lado, cuidados especiais devem ser observados no sentido de evitar as perdas de potássio, cálcio e magnésio por erosão. As quantidades de nutrientes removidas por erosão podem ser bastante significativas, dependendo do manejo utilizado, do tipo de solo e da situação do terreno. Em solos com problemas de infiltração, a maior parte da água da chuva pode ser perdida por escoamento superficial, levando nutrientes na forma de sedimentos e na forma solúvel. Em sistemas de produção, nos quais há aplicação superficial de corretivos e fertilizantes, essas perdas podem ser bastante significativas.

A água de escoamento superficial, que forma as enxurradas, pode conter concentrações de potássio, cálcio e magnésio ligeiramente diluídas em relação à concentração destes elementos na solução do solo. Dependendo da cobertura vegetal e da quantidade de resíduos em decomposição, a concentração na enxurrada de elementos como potássio pode ser superior à concentração na solução do solo. Trabalhando em pastagens com aplicação superficial de calcário, Cassol e outros (2002) observaram concentrações de $6,7 \text{ mg L}^{-1}$ de potássio, $7,1 \text{ mg L}^{-1}$ de cálcio e $2,5 \text{ mg L}^{-1}$ de magnésio, após três chuvas simuladas de 80 mm durante o período seco. Considerando

a quantidade de água escoada superficialmente, as perdas totais foram de $9,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de potássio, $10,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de cálcio e $3,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de magnésio. A concentração dos nutrientes na água escoada superficialmente é menor quando ocorrem chuvas em grandes volumes, por efeito de diluição, mas as perdas totais são proporcionais à quantidade de água escoada.

Em áreas sob plantio direto, a aplicação de corretivos e fertilizantes em cobertura se dá, normalmente, em períodos que antecedem o plantio e que também antecedem as primeiras chuvas de verão. Nessas condições, solos que se mantiveram secos durante o inverno podem apresentar repelência pela água na camada superficial; assim, chuvas de forte intensidade podem provocar grandes perdas de água por escoamento superficial. Nessa situação, as perdas de nutrientes por erosão, especialmente o potássio, podem ser bastante significativas, muitas vezes superando as perdas por lixiviação. É comum observar, em áreas de produção, teores mais elevados de potássio em locais de deposição da água de escoamento superficial, em comparação com maior empobrecimento em termos deste nutriente nas partes mais altas. Com isso, são formadas manchas de fertilidade, de difícil correção, em função da escala espacial em que ocorrem. O potássio liberado pela decomposição das plantas de cobertura e dos resíduos de colheita também pode ser rapidamente removido pela água das enxurradas caso ocorram chuvas de grande volume no período após a dessecação.

Bertol e outros (2004) relataram que a maior parte do potássio perdida por erosão está dissolvida na água da enxurrada, embora, em menor quantidade, parte deste nutriente possa ser perdida na forma de sedimentos. Esses sedimentos podem conter quantidades significativas de potássio nas formas não-trocáveis e estruturais, que se encontravam na camada mais superficial do solo, perto da zona de contato com as raízes. Em sistemas conservacionistas, como o plantio direto, as perdas de nutrientes na forma de sedimentos carregados por processos erosivos é bastante minimizada em relação aos sistemas nos quais há revolvimento da camada superficial do solo. Contudo, as perdas totais de nutrientes por erosão, principalmente na forma de nutrientes dissolvidos na água da enxurrada, podem ser superiores em áreas de plantio direto em relação às áreas de cultivo convencional, por conta da maior concentração superficial de nutrientes sob plantio direto. Isso induz a um falso conceito de que em sistema plantio direto, em que o transporte de sedimentos é minimizado, as perdas de nutrientes por

escoamento superficial são desprezíveis. O produtor deve sempre adotar formas de manejo que promovam o aumento da infiltração de água no solo, reduzindo a quantidade de água no escoamento superficial, também adotando práticas de controle da erosão que impeçam o transporte da água a longas distâncias. Isso faz com que boa parte dos nutrientes solúveis na água da enxurrada permaneça dentro da área de cultivo.

3.5 Ciclagem de potássio, cálcio e magnésio pelas culturas e por plantas de cobertura

Um fato bastante estudado e descrito na literatura é a grande capacidade que as plantas de cobertura têm de assimilar nutrientes e, posteriormente, liberá-los para as culturas subsequentes. Esse mecanismo é bastante importante para as estratégias de adubação, sobretudo para o potássio. As quantidades de nutriente recicladas pelas plantas de cobertura podem variar de alguns poucos quilos até mais de 400 kg ha⁻¹, de acordo com a espécie cultivada, o nível de fertilidade do solo, o nutriente e a biomassa total produzida (Tabela 5). Algumas gramíneas, como milho e as braquiárias, são capazes de reciclar, em um único ciclo, quantidades muito superiores àquelas requeridas pela maioria das culturas de interesse econômico. As quantidades de potássio recicladas pelas plantas são normalmente superiores às de cálcio, as quais, por sua vez, são superiores às de magnésio. Essa relação reflete a concentração proporcional desses elementos no tecido vegetal. A relação (Ca+Mg):K também varia entre espécies, com as gramíneas absorvendo preferencialmente o potássio, com esta relação entre 0,2 e 0,4, enquanto as leguminosas apresentam, em geral, esta relação entre 0,6 e 1,6 (Tabela 5). Parte do potássio absorvido pelas plantas de cobertura vem das camadas subsuperficiais do solo e mesmo de formas não-trocáveis deste elemento. Como algumas gramíneas têm sistema radicular mais profundo, a estratégia do uso dessas plantas, intercalando-as com as culturas econômicas, pode ser bastante eficiente para a recuperação de nutrientes lixiviados a profundidades abaixo do alcance das raízes das principais culturas. O uso de braquiárias em sistema de integração lavoura-pecuária permite a absorção de formas não-trocáveis de potássio e a posterior liberação deste nutriente em formas de maior disponibilidade para a cultura do milho (GARCIA et al., 2008).

Tabela 5. Produção de biomassa, teores no tecido vegetal e quantidades totais absorvidas de potássio, cálcio e magnésio por plantas de cobertura cultivadas em solos brasileiros.

Planta de cobertura	Biomassa (kg ha ⁻¹)	Teor no tecido vegetal (g kg ⁻¹)			Total absorvido (kg ha ⁻¹)			Fonte
		K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	
Aveia preta	4.390	21,4			94,0			Giacomini e outros (2003)
Ervilhaca	2.660	27,8			74,0			
Nabo forrageiro	3.720	23,9			89,0			
<i>Crotalaria juncea</i>	10.253	7,9			81,0			Amabile, Fancelli e Carvalho (1999)
Mucuna	4.000	10,0			40,0			
Guandu	10.103	9,7			98,0			
Aveia preta	10.334	23,3	7,8	2,3	240,8	80,6	23,8	Borkert e outros (2003)
Ervilhaca	5.328	22,9	10,5	2,6	122,0	55,9	13,9	
Guandu	6.105	26,8	8,2	2,6	163,6	50,1	15,9	
Mucuna	5.097	16,8	11,8	2,9	85,6	60,1	14,8	
Tremoço	10.094	19,2	11,9	2,7	193,8	120,1	27,3	

Continua

Conclusão

Tabela 5. Produção de biomassa, teores no tecido vegetal e quantidades totais absorvidas de potássio, cálcio e magnésio por plantas de cobertura cultivadas em solos brasileiros.

Planta de cobertura	Biomassa (kg ha ⁻¹)	Teor no tecido vegetal (g kg ⁻¹)			(Ca+Mg):K	Total absorvido (kg ha ⁻¹)			Fonte
		K	Ca	Mg		K	Ca	Mg	
Milheto	10.800	38,6	7,1	3,7	0,3	417,0	76,3	39,8	Boer e outros (2007)
Amaranto	2.890	48,4	20,1	11,4	0,7	140,0	58,0	33,0	
<i>Eleusine</i> sp.	8.753	20,1	8,9	5,8	0,7	176,0	78,0	51,0	
Milheto	10.300	21,3				218,9			Torres e Pereira (2008)
Sorgo forrageiro	7.100	14,7				104,5			
<i>Crotalaria juncea</i>	3.900	15,2				59,2			
Aveia preta	2.400	13,9				33,4			
Guandu	1.600	19,4				31,0			
<i>B. brizantha</i>	6.000	35,8				214,7			
Milheto	2.907	17,5	3,8	1,6	0,3	50,9	11,0	4,7	Teixeira e outros (2005)
Feijão de porco	2.728	13,8	20,9	1,6	1,6	37,6	57,0	4,4	
Guandu-anão	676	12,2	9,3	0,9	0,8	8,2	6,3	0,6	
Milheto	6.929	17,1	4,2	2,4	0,4	116,0	29,0	17,0	Benites e outros (2009)
<i>B. brizantha</i>	2.624	25,2	2,3	2,5	0,2	65,0	6,0	7,0	

Após a morte das plantas de cobertura, seja por dessecação química, corte ou senescência natural, ocorre a liberação dos nutrientes contidos em sua biomassa, sendo a velocidade de liberação diferente para cada nutriente. Enquanto o potássio dos restos vegetais é liberado rapidamente, e quase totalmente retornado ao solo em forma disponível ainda durante a fase inicial da cultura subsequente (GIACOMINI et al., 2003), o magnésio e o cálcio, nesta sequência, demoram mais para ser disponibilizados (BOER et al., 2008; CARPIM et al., 2008). Esse efeito se dá em função da forma com que o potássio se apresenta no interior do tecido vegetal, ou seja, na forma iônica não associada a nenhum componente estrutural das plantas (MARSCHNER, 1995).

Assim, diferentemente do que ocorre com cálcio e magnésio, a lixiviação de potássio da palhada de plantas de cobertura não depende da decomposição da biomassa. A transferência de potássio da palhada para o solo depende fundamentalmente da quantidade de chuva após a morte dos tecidos. Em ausência de chuvas suficientes para promover a lixiviação da cobertura de palhada do solo, não ocorre a liberação de potássio (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2003). Contudo, Calonego, Foloni e Rosolem (2005) mostraram que quantidade significativa de potássio retorna ao solo por exsudação radicular após a dessecação química das plantas de cobertura, em ausência de lixiviação por chuva. Em outro extremo, chuvas intensas, que geram enxurrada em períodos após a dessecação de plantas de cobertura, como visto anteriormente, podem resultar em perdas significativas de potássio por escoamento superficial.

Na prática, o grande aporte de potássio resultante da ciclagem pelas plantas de cobertura é normalmente negligenciado pelos agricultores (BORKERT et al., 2003). Mesmo considerando-se as significativas quantidades de potássio na palhada e a rápida velocidade de ciclagem, é comum a adição de fertilizantes potássicos na implantação das culturas comerciais. Essa é uma situação em que a época de aplicação de fertilizantes dentro do sistema de produção deve ser revista a fim de se evitar aumento acima do recomendável dos teores de potássio na solução do solo, o que pode resultar em desequilíbrios nutricionais, especialmente em relação ao magnésio, e à maior suscetibilidade a perdas por lixiviação, principalmente em solos arenosos.

3.6 Exportação de potássio, cálcio e magnésio pela colheita das principais culturas comerciais no Brasil

Entre os três elementos, o potássio é o extraído em maior quantidade pelas principais culturas de interesse econômico no Brasil. Esse fator, combinado com a baixa disponibilidade natural desse elemento na maioria dos solos brasileiros, faz com que a adubação potássica de manutenção seja fundamental para a sustentabilidade da produção ao longo do tempo. Embora em quantidades menores, o cálcio e o magnésio também são exportados nas colheitas (Tabela 6). Em função de sua alta disponibilidade nos solos cultivados, a deficiência desses dois elementos demora mais tempo para ser sentida. Contudo, estudos mais recentes têm apontado a necessidade de reposição anual de magnésio, uma vez que a maioria dos fertilizantes comercializados no Brasil não contém este elemento em sua formulação.

Culturas como soja e algodão exportam grandes quantidades de potássio, sendo a relação absorção:exportação em torno de 50% (CARVALHO et al., 2008; EMBRAPA, 2008). Os cereais, por outro lado, embora absorvam e necessitem de grande quantidade de potássio para seu pleno desenvolvimento, exportam apenas uma pequena proporção do total absorvido. Em sistemas de rotação em que se alternam leguminosas e cereais, ou algodão e cereais, pode-se adotar a estratégia de utilização do potássio residual da palhada dos cereais para a nutrição da cultura subsequente (VITOSH; JOHNSON; MENGEL, 1995). No caso de rotação soja-milho ou soja-trigo, pode-se deslocar parte do potássio da adubação da soja para o plantio do cereal, uma vez que os cereais são mais responsivos a este nutriente e o potássio residual pode ser parcial ou integralmente aproveitado pela soja no próximo ciclo. Rosolem (1998) confirmou essas observações, relatando que no sistema plantio direto, a quantidade de potássio acumulado na palha da superfície do solo, bem como a disponibilidade deste nutriente ao longo do tempo interferem na intensidade de sua reciclagem. Isso caracteriza a adubação de sistema, prática que tem ganhado muitos adeptos nos últimos anos. É importante ressaltar que isso somente é possível caso várias práticas conservacionistas sejam adotadas, a fim de, no período da entressafra, evitar as perdas dos nutrientes reciclados pelas culturas.

O caso da cana-de-açúcar é ainda mais importante quando se observam as grandes quantidades de potássio exportadas. A parte de

Tabela 6. Teores de potássio, cálcio e magnésio na parte colhida das principais culturas agrícolas brasileiras em valor de produção e as quantidades desses nutrientes que são exportadas, considerando-se a produtividade média nacional.

Produto	Produtividade ¹ (kg ha ⁻¹)	Teores na parte colhida			Quantidade exportada			Fonte ²
		K	Ca	Mg	K ₂ O	Ca	Mg	
		----- (g kg ⁻¹) ----- (kg ha ⁻¹) -----						
Soja	2.629	16,9	2,0	3,0	52	5	8	Embrapa (2008)
Milho	3.532	5,0	0,4	1,7	21	1	6	Hiroce, Furlani e Lima (1989)
Cana-de-açúcar	80.769	1,3	0,2	0,2	107	18	17	Tasso Junior e outros (2007)
Arroz	4.357	4,0	1,8	1,3	20	8	5	Crusciol e outros (2003)
Trigo	2.209	3,1	0,6	2,4	8	1	5	Coelho e outros (2001)
Feijão	847	14,4	1,7	1,9	14	1	2	Teixeira e outros (2005)
Algodão com caroço	3.660	18,4	4,0	3,4	79	15	12	Carvalho e outros (2008)

¹ Produtividade média nacional, safra 2008/2009 (CONAB, 2009).

² Referências para os teores de nutrientes nas partes colhidas.

interesse econômico dessa cultura são os colmos, que possuem quantidade muito grande de potássio, a exemplo do colmo de outras gramíneas, como milho, milheto e sorgo. No caso da cana-de-açúcar, quase a totalidade do potássio é eliminada no processo industrial na forma de resíduos como a vinhaça, o bagaço e as cinzas de caldeira, uma vez que os produtos comerciais das usinas são o açúcar e o álcool, carboidratos praticamente isentos de elementos minerais. Vale ressaltar que a cultura da cana-de-açúcar consome cerca de 20% de todo o cloreto de potássio utilizado no Brasil. Nesse cenário, o reaproveitamento planejado dos resíduos de produção, considerando a distribuição espacial da reposição dos nutrientes extraídos, utilizando técnicas de agricultura de precisão, é estratégico tanto sob o ponto de vista econômico para os produtores como para a redução da dependência externa brasileira por este nutriente.

3.7 Adição de potássio, cálcio e magnésio na forma de corretivos e fertilizantes

Para compensar as extrações pelas colheitas e as perdas por lixiviação e erosão, é necessário repor potássio, cálcio e magnésio periodicamente nos solos agrícolas. Essa reposição pode ser feita pelo uso de corretivos e fertilizantes. Para essa prática, é importante que fatores como dose, época de aplicação, fonte do nutriente e forma de aplicação sejam observados, levando em consideração a peculiaridade de cada sistema de produção (BRUULSEMA; LEMUNYON; HERZ, 2009). No caso de sistemas tropicais, observa-se grande flexibilidade em relação a fontes, época e forma de aplicação, considerando-se que nesses sistemas as condições climáticas são favoráveis durante um longo período, permitindo cultivos sucessivos e viabilizando o uso de fontes de menor solubilidade. A agricultura em clima temperado, ao contrário, exige o uso de fontes de alta solubilidade e rápida disponibilidade para as plantas, vez que o período climático favorável anualmente é muito curto e não há tempo para que ocorram as reações no solo que promovem a liberação de nutrientes de fontes de menor solubilidade (JOHNSTON, 2007). Como grande parte da tecnologia utilizada no Brasil foi importada dos países de clima temperado, ainda predomina o conceito da necessidade de fontes de alta solubilidade, que reflete tanto nas recomendações de adubação atualmente utilizadas quanto no direcionamento da pesquisa tecnológica com fertilizantes e na própria legislação brasileira. Contudo, observa-se o crescente interesse pelo uso de tecnologias mais adaptadas à situação tropical, com a utilização

de sistemas de produção intercalando plantas de interesse comercial e plantas recicladoras (GARCIA et al., 2008), podendo essas tecnologias viabilizar o uso de fontes de nutrientes de menor solubilidade e melhorar o aproveitamento do efeito residual das adubações.

3.7.1 Fontes de potássio, cálcio e magnésio para a agricultura brasileira

Na Tabela 7 e Tabela 8, são apresentadas as principais fontes minerais de potássio, cálcio e magnésio encontradas no Brasil e suas respectivas garantias e características estabelecidas pela legislação brasileira (BRASIL, 2008).

Entre os fertilizantes potássicos, o mais comum e mais utilizado no Brasil e no mundo é o cloreto de potássio (KCl). Devido à sua elevada concentração em K_2O (58% a 62%), o KCl é mais competitivo em relação a outras fontes disponíveis no mercado e responde por mais de 95% dos fertilizantes potássicos consumidos no Brasil (ANDA, 2008). O KCl produzido no Brasil (em Sergipe) corresponde a cerca de apenas 10% da demanda total de K_2O da agricultura nacional, sendo o restante da demanda atendido pela importação do nutriente, sobretudo na forma de KCl, principalmente do Canadá e da Rússia.

O sulfato de potássio (K_2SO_4) é empregado na adubação de culturas cuja qualidade do produto colhido é prejudicada por altas concentrações de cloro e em cultivos de alto valor agregado. Nos últimos anos, K_2SO_4 vem sendo eventualmente utilizado na agricultura orgânica, uma vez que o uso do KCl é vetado neste tipo de produção agrícola.

Existe uma gama de produtos que podem servir como importantes fontes de potássio. Fontes orgânicas, como vinhaça, esterco de aves, cama de aves, cinzas e palha de café são opções muito interessantes em regiões em que tais produtos estão disponíveis. Quase sempre as fontes orgânicas de potássio também contêm cálcio e magnésio, normalmente em menor concentração, embora alguns resíduos, como a cama de aves, possam conter elevados teores de cálcio em decorrência da incorporação de corretivos durante a produção do resíduo (OLIVEIRA, P. A. V., 1993). A quantidade de potássio contida nos resíduos de aves e suínos produzidos no Brasil encontra-se na ordem de centenas de milhares de toneladas de K_2O , o que significa um pouco menos que 10% do total de fertilizantes potássicos consumidos no Brasil (Tabela 9).

Tabela 7. Fertilizantes minerais contendo potássio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Acetato de potássio	38% de K_2O	Potássio solúvel em água na forma de acetato ($KC_2H_3O_2$)	
Carbonato de potássio	66% de K_2O	Potássio solúvel em água na forma de carbonato (K_2CO_3)	
Cloreto de potássio	58% de K_2O	Potássio na forma de cloreto determinado como K_2O solúvel em água	
Fosfato monopotássico	33% de K_2O 51% de P_2O_5	Fósforo determinado como P_2O_5 solúvel em água e K_2O solúvel em água, (KH_2PO_4)	
Solução de fosfito de potássio	20% de K_2O 27% de P_2O_5	P_2O_5 e K_2O solúveis em água	Pode conter no máximo 2% de sódio residual; fósforo na forma de fosfito (PO_3^{3-})

Continua

Conclusão

Tabela 7. Fertilizantes minerais contendo potássio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Hidróxido de potássio	71% de K_2O	Potássio na forma de hidróxido (KOH), determinado como K_2O solúvel em água	
Nitrato de potássio	44% de K_2O 12% de N	Potássio determinado como K_2O solúvel em água	
Solução de silicato de potássio	10% de K_2O 10% de Si	Silício solúvel em água; potássio solúvel em água	
Sulfato de potássio	48% de K_2O 15% de S	Potássio na forma de sulfato, determinado como K_2O solúvel em água	De 0 a 1,2% de magnésio
Sulfato de potássio e magnésio	20% de K_2O 10% de Mg 20% de S	Potássio e magnésio determinados como K_2O e Mg solúveis em água	

Fonte: Adaptada de Brasil (2008).

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Acetato de cálcio	18% de Ca	Cálcio solúvel em água na forma de acetato $[\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$	
Acetato de magnésio	13% de Mg	Magnésio solúvel em água na forma de acetato $[\text{Mg}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2]$	
Alga marinha lithothamnium	32% de Ca 2% de Mg	Cálcio total; magnésio total; especificação granulométrica: pó	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Carbonato de cálcio	32% de Ca	Cálcio total como carbonato (CaCO_3); especificação granulométrica: pó	Apresenta também característica de corretivo de acidez; pode conter até 3% de magnésio
Carbonato de cálcio e magnésio	18% de Ca 3% de Mg	Cálcio e magnésio totais como carbonato; especificação granulométrica: pó	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Carbonato de magnésio (magnesita)	25% de Mg	Magnésio total como carbonato (MgCO_3)	Apresenta também característica de corretivo de acidez

Continua

Continuação

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Cloreto de cálcio	24% de Ca	Cálcio solúvel em água na forma de cloreto ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	
Cloreto de magnésio	10% de Mg	Magnésio solúvel na forma de cloreto ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	
Escória de desfosforização	18% de Ca 12% de P_2O_5	Granulometria: partículas devem passar 75% em peneira de 0,15 mm (ABNT nº 100)	
Escória silicatada	10% de Ca 10% de Si	Especificação granulométrica: pó	Apresenta também característica de corretivo de acidez; pode conter magnésio
Farinha de osso calcinado	16% de Ca 20% de P_2O_5		

Continua

Continuação

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Farinha de osso autoclavado	16% de Ca 10% de P_2O_5 1% de N		Pode conter 3% ou mais de carbono orgânico
Fosfato natural	20% de Ca 24% de P_2O_5	Partículas devem passar 85% em peneira de 0,075 mm (ABNT n° 200)	
Fosfato parcialmente acidulado	16% de Ca 20% de P_2O_5		Pode conter até 6% de enxofre e até 2% de magnésio
Fosfato natural reativo	28% de Ca 27% de P_2O_5	Granulometria: partículas devem passar 100% na peneira de 4,8 mm (ABNT n° 4) e passar 80% na peneira de 2,8 mm (ABNT n° 7)	
Solução de fosfito de cálcio	5% de Ca 28% de P_2O_5	P_2O_5 solúvel em água e cálcio solúvel em água	Pode conter no máximo 2% de sódio residual; fósforo na forma de fosfito (PO_3^{-3})

Continua

Continuação

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Solução de fosfito de magnésio	3% de Mg 28% P_2O_5	P_2O_5 solúvel em água e magnésio solúvel em água	Pode conter no máximo 2% de sódio residual; fósforo na forma de fosfito (PO_3^{-3})
Hidróxido de cálcio	48% de Ca	Cálcio total como hidróxido $[Ca(OH)_2]$	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Hidróxido de cálcio e magnésio	24% de Ca 4% de Mg	Cálcio e magnésio total como hidróxido	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Hidróxido de magnésio	35% de Mg	Magnésio na forma de $Mg(OH)_2$	Produto insolúvel em água
Kieserita	15% de Mg 20% de S	Magnésio solúvel em água ($MgSO_4 \cdot H_2O$)	
Nitrato de cálcio	16% de Ca 14% de N		
Nitrato de magnésio	8% de Mg 10% de N	Magnésio solúvel em água na forma de $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	

Continua

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Óxido de cálcio	64% de Ca	Cálcio total como óxido (CaO)	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Óxido de cálcio e magnésio	32% de Ca 6% de Mg	Cálcio e magnésio total como óxido	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Óxido de magnésio	45% de Mg	Magnésio total como óxido (MgO)	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Silicato de cálcio	29% de Ca 20% de Si	Cálcio total; silício total na forma de silicato	Pó, farelado, farelado fino e granulado; apresenta também característica de corretivo de acidez
Silicato de cálcio e magnésio	7% Ca 1% de Mg 10% de Si	Cálcio total; magnésio total; silício total na forma de silicato	Pó, farelado, farelado fino e granulado; apresenta também característica de corretivo de acidez

Continua

Continuação

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Sulfato de cálcio (gesso agrícola, fosfogesso, gesso mineral, gipsita)	16% de Ca 13% de S	Cálcio e enxofre determinados na forma elementar	Apresenta também característica de corretivo de sodicidade
Sulfato de magnésio	9% de Mg 11% de S	Magnésio solúvel em água (MgSO ₄ .xH ₂ O)	
Sulfato de potássio e magnésio	10% de Mg 20% de K ₂ O 20% de S	Potássio e magnésio determinados como K ₂ O e magnésio solúveis em água	
Superfosfato duplo	16% de Ca 28% de P ₂ O ₅ 5% de S	Fósforo determinado como P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio mais água e mínimo de 24% solúvel em água; cálcio e enxofre total	
Superfosfato simples	16% de Ca 18% de P ₂ O ₅ 8% de S	Fósforo determinado como P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio mais água e mínimo de 15% solúvel em água; cálcio e enxofre total	

Continua

Tabela 8. Fertilizantes minerais contendo cálcio e magnésio utilizados no Brasil.

Fertilizante	Garantia mínima	Características	Observações
Superfosfato triplo	10% de Ca 41% de P ₂ O ₅	Fósforo determinado como P ₂ O ₅ solúvel em citrato neutro de amônio mais água e mínimo de 36% solúvel em água	
Termofosfato magnésiano	7% de Mg 16% de Ca 17% de P ₂ O ₅	Fósforo determinado como P ₂ O ₅ total e mínimo de 11% em ácido cítrico a 2% na relação de 1:100; cálcio e magnésio total; granulometria: partículas devem passar 75% em peneira de 0,15 mm (ABNT n° 100)	Apresenta também característica de corretivo de acidez
Termofosfato magnésiano potássico	7% de Mg 4% de K ₂ O 16% de Ca 12% de P ₂ O ₅ 10% de Si	Fósforo determinado como P ₂ O ₅ total e mínimo de 6% solúvel em ácido cítrico a 2% na relação 1:100; potássio determinado como K ₂ O solúvel em ácido cítrico a 2% na relação 1:100; cálcio, magnésio e silício determinados como teores totais; granulometria: pó e farelado fino	Apresenta também característica de corretivo de acidez

Fonte: Adaptada de Brasil (2008).

Tabela 9. Teores e quantidades totais de potássio, cálcio e magnésio em resíduos de suínos e aves no Brasil.

Resíduo	Produção anual brasileira ¹	Teores de nutrientes ²			Total de nutrientes por ano		
		K ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	CaO	MgO
Dejeito líquido de suínos	105.600.000 m ³	1,56	0,47	0,12	164,74	49,63	12,67
Cama de aviário	7.808.000 t	25,02	50,74	12,78	195,36	396,18	99,79
		----- (kg t ⁻¹ ou kg m ⁻³) -----			----- (1.000 t) -----		

¹ Produção de resíduos calculada a partir da produção nacional de animais (CONAB, 2009) e da produção de resíduos por unidade animal (OLIVEIRA, P. A. V., 1993).

² Teores médios de nutrientes em resíduos de suínos e aves, conforme análises do Laboratório de Solos da Universidade de Rio Verde (FESURV).

A quantidade de potássio presente na vinhaça e em outros resíduos do processamento da cana-de-açúcar produzidos anualmente nas usinas brasileiras apresenta valores bem superiores. Considerando a produção nacional de 612 milhões t de cana-de-açúcar (CONAB, 2009), a quantidade média de 1,53 kg de K_2O por tonelada de cana-de-açúcar colhida e que todo esse potássio tem como destino os resíduos de produção, estima-se que estes resíduos contenham cerca de 940 mil t de K_2O . Esses valores correspondem a cerca de um quarto do potássio consumido anualmente no Brasil. É importante ressaltar que o potássio presente nos resíduos da produção de álcool e açúcar, assim como nos resíduos da produção animal, ocorre na forma livre e, portanto, é rapidamente retornado para o solo após a aplicação dos resíduos. Para efeito de adubações para culturas anuais, pode-se considerar que a totalidade do potássio presente no resíduo estará disponível para as culturas logo no primeiro ciclo após sua aplicação.

O potássio também está presente em teores normalmente baixos em determinados tipos de rochas de ocorrência no território nacional, as quais apresentam potencial para utilização na agricultura como fontes complementares aos fertilizantes tradicionais (RESENDE et al., 2006). Essa estratégia é atualmente objeto de diversas pesquisas conduzidas no país. Contudo, considerando-se as elevadas quantidades necessárias desse tipo de produto para atender a demanda das culturas, os custos de transporte e beneficiamento tornam essas fontes menos viáveis do que fontes solúveis, como o cloreto de potássio, quando o foco é o fornecimento de potássio. A presença de outros nutrientes associados nas rochas, como cálcio, magnésio e alguns micronutrientes, pode tornar algumas dessas fontes viáveis em âmbito regional. Deve-se considerar que, pela escassez de depósitos evaporíticos de potássio no Brasil, a identificação, a caracterização e a viabilização do uso de rochas de menor solubilidade como fontes deste nutriente é tema de relevância estratégica para o país.

Embora existam vários produtos que podem ser utilizados como fontes de cálcio e magnésio (Tabela 8), esses nutrientes são adicionados ao solo principalmente por meio das práticas de calagem e gessagem, para correção da acidez do solo e do subsolo, respectivamente, os quais são problemas generalizados na maioria das regiões em que se desenvolve a atividade agrícola no Brasil. Calcários, gesso (sulfato de cálcio) e escórias de siderurgia são fontes abundantes e economicamente atrativas para o suprimento de cálcio e magnésio.

Os calcários apresentam proporções variáveis de cálcio e magnésio. Atualmente, os calcários são classificados em dois tipos: quando o teor de MgO fica abaixo de 5%, tem-se o calcário calcítico e, acima deste teor, trata-se de calcário dolomítico. O uso de silicato de cálcio como corretivo e fonte de silício tem se difundido em várias regiões. Nos silicatos em geral (escórias de siderurgia), predomina a presença de cálcio, mas estes produtos também podem apresentar teores variados de magnésio. Recentemente, novos produtos vêm sendo propostos para o suprimento de potássio, cálcio e magnésio combinados a outros nutrientes e determinados compostos químicos em aplicações foliares. É o caso do silicato de potássio e dos fosfitos de potássio, cálcio ou magnésio. Os efeitos do uso dessas fontes sobre o vigor e a produtividade das culturas precisam ser investigados em detalhes, assim como suas vantagens em relação às fontes convencionais em diferentes sistemas de produção agrícola. Contudo, deve ficar claro que a nutrição vegetal com esses nutrientes se dá predominantemente pela absorção radicular e, especialmente para cálcio, a manutenção de concentrações adequadas no solo é fundamental para a garantia tanto de sistema radicular bem desenvolvido como de bom potencial de produção.

3.7.2 Época e forma de aplicação de fontes de potássio, cálcio e magnésio em sistemas agrícolas brasileiros

Para a determinação da melhor época e forma de aplicação de uma fonte de nutriente, há de se considerar a sua dinâmica no solo e na planta, além de sua função sobre o crescimento vegetal. O cálcio deve ser tratado de forma diferente do magnésio e do potássio. Devido à sua importante função no desenvolvimento do sistema radicular e à sua baixa mobilidade no interior da planta, é necessário que o cálcio se encontre mais bem distribuído na camada do solo explorada pela rizosfera. Além disso, em geral, o calcário apresenta baixa solubilidade, razão pela qual requer adequado contato com as partículas de solo para reagir. O cálcio proveniente do calcário funciona como direcionador do crescimento radicular e a melhor forma de aplicá-lo no solo é a lanço, com posterior incorporação na camada superficial do solo, procurando colocá-lo o mais profundamente possível, considerando o custo energético envolvido e o custo total da operação. Essa operação deve anteceder a implantação de qualquer sistema de produção comercial. Contudo, os agricultores negligenciam sua importância, o que resulta em

menor eficiência da calagem na correção da acidez do solo (QUAGGIO, 2000). Andrade (1991) afirmou que a eficiência da calagem envolve diversos fatores, tais como a quantidade, a qualidade, a profundidade de incorporação e o intervalo entre aplicações.

Na aplicação de calcário em sistema plantio direto já consolidado, não há necessidade de revolvimento do solo para incorporação do insumo. Esta prática já está bem estabelecida, sendo rotineiramente adotada pelos agricultores (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 2004; PÖTTKER, 1998; SÁ, 1999; SOUSA, 1998). Os vários mecanismos sugeridos para explicar os efeitos da calagem superficial nas camadas subsuperficiais em sistema plantio direto são apresentados no Quadro 1.

Em sistema plantio direto já estabelecido e em culturas perenes, uma vez que não é mais viável incorporar o corretivo, o gesso agrícola passa a ser uma boa opção, por permitir maior mobilidade do cálcio até camadas mais profundas do solo (CARVALHO; RAIJ, 1997).

A incorporação de corretivos como o calcário, visando a correção da acidez do solo, permite a adição de cálcio e de magnésio em quantidades muito superiores às demandadas pelas culturas, o que resulta em longo efeito residual desta prática.

Em relação ao potássio e ao magnésio, por sua maior mobilidade no interior da planta, torna-se possível a aplicação localizada no sulco ou mesmo a aplicação superficial em cobertura. O magnésio, que é absorvido em menor quantidade pelas plantas, tem sua adição negligenciada pela maioria dos produtores, uma vez que se considera que o fornecimento via corretivo é capaz de suprir toda a demanda das plantas. Todavia, experimentos de longa duração têm demonstrado que o uso contínuo de formulações comerciais sem magnésio leva à redução dos teores deste elemento nos solos e a menores níveis foliares (RÖMHELD; KIRKBY, 2007). A aplicação periódica de calcário em superfície na entressafra é uma opção para o suprimento de magnésio e, atualmente, é a prática mais adotada no país. Entretanto, o produtor deve fazer uma análise econômica para determinar a viabilidade de utilização de fórmulas mais completas de adubação anual, que contenham, além de NPK, macronutrientes secundários, como cálcio e magnésio, de forma a compensar as quantidades exportadas pelas colheitas.

Quadro 1. Mecanismos sugeridos para explicar o efeito da calagem superficial em sistema plantio direto na diminuição de alumínio e elevação dos teores trocáveis de cálcio e magnésio.

Mecanismo de ação da calagem em sistema plantio direto	Fonte
Deslocamento mecânico de partículas finas de calcário pelo movimento descendente de água, através dos canais formados pelas raízes mortas e galerias abertas pela micro, meso e macrofauna do solo.	Oliveira e Pavan (1996), Sá (1999), Caires, Banzato e Fonseca (2000)
Ação da fauna do solo na mistura de partículas de calcário com resíduos das culturas, os quais são transportados ao longo do perfil, formando sítios de matéria orgânica, cálcio e magnésio.	Sá (1999), Rheinheimer e outros (2000)
Movimento descendente do íon bicarbonato (HCO_3^-) acompanhado de Ca^{2+} e Mg^{2+} , formando uma frente alcalinizante.	Oliveira e Pavan (1996), Amaral e Anghinoni (2001)
Deslocamento de Ca^{2+} e Mg^{2+} para as camadas subsuperficiais acompanhando o movimento dos ânions Cl^- , SO_4^{2-} e NO_3^- , provenientes da mineralização dos resíduos orgânicos superficiais ou das aplicações de corretivos e fertilizantes.	Carvalho e Rajj (1997), Amaral e Anghinoni (2001)
Formação de complexos orgânicos solúveis de baixo peso molecular pela mineralização dos resíduos das culturas depositados na superfície do solo, deslocando Ca^{2+} e Mg^{2+} pelo perfil.	Sá (1999), Franchini e outros (1999), Myazawa, Pavan e Franchini (2000)

Fonte: Adaptado de Oliveira e outros (2002).

O manejo adequado da adubação potássica, em relação a fonte, doses, época e modos de aplicação (sulcos, a lanço e parcelada) pode *minimizar perdas, evitar o esgotamento do nutriente no solo, aumentar seu efeito residual e a produtividade das culturas por unidade de nutriente aplicado ao solo* (VILELA; SOUSA; SILVA, 2002). A época e o modo mais adequados de aplicação de potássio, como de qualquer outro nutriente, são determinados em função da exigência das plantas e da dinâmica do elemento no solo (SILVA et al., 1984). Como estratégia de adubação potássica, deve-se separar a adubação corretiva da adubação de manutenção. Lopes (1999) salientou que, ao entrar no sistema plantio direto, é recomendável fazer adubação potássica corretiva a lanço, enquanto as adubações de manutenção seguintes devem ser feitas no sulco até que o solo atinja teores médios a altos do nutriente.

A prática mais comum adotada hoje no Brasil é a aplicação de KCl no sulco de plantio, por meio do uso de fórmulas comerciais ricas em potássio (ANDA, 2008). A adubação potássica de semeadura, normalmente realizada no sulco, deve ser feita 5 cm abaixo do solo e ao lado das sementes. Isso porque a aplicação de altas doses de potássio no sulco de semeadura, acima de 60 kg ha⁻¹, pode causar sérios prejuízos à germinação das sementes e ao desenvolvimento inicial das plantas, pelo efeito salino (SABINO et al., 1984). Assim, o restante da dose de potássio que não foi fornecida na semeadura deve ser parcelado e aplicado a lanço em cobertura, no período de maior exigência da cultura (FAO, 1998; ISHERWOOD, 1998; JOHNSTON, 2000). O parcelamento também pode aumentar a eficiência de uso do nutriente em solos arenosos, como mostrado por Oliveira e outros (1992), os quais trabalharam em diferentes solos da região do Cerrado e verificaram que, em um Neossolo Quartzarênico, a produtividade de soja foi maior quando a dose de 60 kg ha⁻¹ foi parcelada em comparação à aplicação no sulco de plantio.

Vários trabalhos têm demonstrado que não há diferença na absorção de potássio pelas plantas se o fertilizante for aplicado a lanço ou no sulco de plantio, podendo até mesmo ser aplicado antecipadamente ao plantio da cultura comercial (LANA et al., 2003; RAIJ et al., 1996; SIMONETE et al., 2002). Em alguns sistemas de produção de grãos e fibras em solos com fertilidade construída, a aplicação de potássio a lanço tem ganhado espaço nos últimos anos. Essa prática é viabilizada por conta da melhoria das condições físicas, químicas e biológicas e da introdução das culturas

de cobertura em sistemas conservacionistas (CASTRO, 1993). A prática consiste na antecipação da aplicação total ou parcial da dose recomendada de fertilizante para a cultura de verão, no momento da adubação da cultura antecessora, na forma de adubação a lanço ou incorporada. Na dessecação da cultura de cobertura, os nutrientes fornecidos antecipadamente retornam para o sistema e tornam-se disponíveis para a cultura principal.

Francisco, Câmara e Segatelli (2007) mostraram que a antecipação da adubação da soja, por ocasião da semeadura do capim-pé-de-galinha, não interferiu no acúmulo de matéria seca, na exportação de nutrientes pelos grãos, nem na produtividade agrícola da soja. Porém, o capim-pé-de-galinha respondeu positivamente à adubação da soja aumentando a produção de matéria seca e a extração de nutrientes. FOLONI e ROSELEM (2008) avaliaram a antecipação da adubação potássica para a soja na semeadura do milho. Observaram que, ao longo de três safras, as adubações poderiam ser antecipadas totalmente na semeadura da gramínea de cobertura sem comprometer o acúmulo de potássio e a produtividade da lavoura de soja e ainda minimizando a exportação deste nutriente pela colheita de grãos de soja. Bernardi e outros (2009) verificaram que a antecipação da adubação recomendada para o algodoeiro aumentou a produção de matéria seca da cultura de cobertura sem comprometer a produtividade e a qualidade das fibras do algodão.

As vantagens da prática da adubação antecipada são otimização de operações, redução de custos, diminuição da quantidade de adubos no sulco de semeadura, redução das perdas por lixiviação, possibilidade de maior desenvolvimento vegetativo da cultura de cobertura (FOLONI; ROSELEM, 2008; FRANCISCO; CÂMARA; SEGATELLI, 2007; MATOS; SALVI; MILAN, 2006; SILVA; ROSELEM, 2001).

Em decorrência da grande variabilidade espacial que se observa para os teores de potássio no solo em relação a outros elementos, práticas de agricultura de precisão podem ser uma boa opção para reduzir custos em função da otimização do uso de fertilizantes potássicos. Hurtado e outros (2009) demonstraram que mesmo em solos de fertilidade corrigida, o manejo sítio-específico da adubação potássica permite redução do uso de fertilizantes com manutenção da produtividade. A aplicação do fertilizante potássico em taxa variável, de forma antecipada ao plantio da cultura comercial, é uma estratégia que tem ganhado espaço nos sistemas de produção de grãos de maior nível tecnológico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do embasamento teórico acima exposto, que detalha os mecanismos envolvidos nos ciclos do potássio, cálcio e magnésio em ecossistemas agrícolas, são propostas boas práticas para o manejo desses nutrientes na agricultura brasileira. Antes, porém, é preciso enfatizar que os aspectos econômicos, sociais e ambientais específicos de cada unidade de produção devem ser sempre considerados para a escolha das melhores práticas. Não há um pacote de boas práticas que possa ser aplicado indiscriminadamente em qualquer situação. O primeiro passo para a definição da melhor forma de manejar os nutrientes em um sistema de produção é entender, no maior nível de detalhes possível, as características de solo, clima, culturas utilizadas e disponibilidade de fontes de nutrientes na região, considerando os aspectos técnicos e econômicos.

Há de se considerar, ainda, que as condições climáticas predominantes no Brasil permitem uma estação de crescimento bem longa, comparativamente às regiões de clima temperado, de onde importamos a maior parte das recomendações de técnicas agrícolas praticadas no Brasil até o final do século passado. Logo, há a necessidade de “tropicalização” dessas técnicas, e esse conceito se adequa perfeitamente ao caso do uso de fertilizantes. Para as recomendações de manejo de fertilidade do solo, deve-se considerar todo o sistema agrícola, compreendendo o efeito residual da adubação e a ciclagem de nutrientes, e não apenas uma cultura em separado.

Outro importante fator é que as pesquisas no Brasil, que deram origem à maior parte das recomendações para diagnose e manejo da fertilidade do solo, foram desenvolvidas com base no preparo convencional do solo (aração e gradagem). Portanto, faz-se necessário rever muitos conceitos, em virtude da adoção do sistema plantio direto (MIELNICZUK, 2005). Com o advento e a consolidação do plantio direto, os mecanismos que envolvem a retenção de nutrientes pela matriz do solo, sua mobilidade no perfil e sua disponibilidade para as plantas foram modificados, resultando em nova dinâmica, a qual deve ser considerada para efeito das recomendações. Logo, ainda persiste o conceito errôneo de que as práticas de adubação e de uso de corretivos já estão amplamente estudadas e definidas para os sistemas agrícolas no Brasil. Ao contrário, as práticas correntes precisam ser revistas e adaptadas para os sistemas atualmente adotados, procurando atingir maior eficiência de uso de nutrientes e redução nos custos de produção.

A base para qualquer sistema agrícola sustentável econômica e ambientalmente é um perfil de solo corrigido. Na construção da fertilidade do perfil, o cálcio apresenta fundamental importância, pelo seu papel sobre o crescimento de raízes. A elevação dos teores de cálcio nas camadas subsuperficiais garante condições para melhor desenvolvimento do sistema radicular, que resulta em maior capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas e menores riscos de danos por estresse hídrico. A forma mais econômica de promover essa correção é incorporando calcário por meio de práticas mecânicas. Áreas agrícolas nas quais a correção do perfil foi realizada previamente à adoção do sistema plantio direto mostraram-se economicamente sustentáveis, enquanto naquelas em que se tentou implantar o sistema plantio direto sem a correção prévia do perfil, os sistemas entraram em colapso. Juntamente com o cálcio, quantidades expressivas de magnésio podem ser supridas com a calagem. Uma vez que a relação Ca:Mg apresenta pouco efeito sobre a maioria das culturas, é recomendável que sempre se utilizem calcários com o maior teor possível de magnésio, considerando-se que esta é a fonte mais barata deste nutriente no mercado brasileiro. Apesar de simples e extremamente vantajosa, a calagem tem sido relegada a segundo plano pelos agricultores.

Após a correção do perfil de fertilidade, a manutenção dos teores de cálcio pode ser feita pela adição anual de fertilizantes formulados que contenham este nutriente, ou pela aplicação superficial periódica de calcário ou de outras fontes de cálcio. Muitas fórmulas de fertilizantes contêm este nutriente em quantidades compatíveis com as extraídas pelas culturas. Já para a manutenção dos teores de cálcio nas camadas subsuperficiais, a aplicação de gesso é a prática mais recomendada.

Em relação ao magnésio, a situação é mais complexa, uma vez que pouca atenção tem sido dada à sua adição nas adubações anuais, embora esta deva ser uma tendência para as próximas décadas. Na ausência de formulações contendo magnésio, a reposição periódica do nutriente pode ser conseguida pela aplicação superficial de calcário dolomítico, prática comum em áreas de produção de grãos sob sistema plantio direto.

O potássio é, entre os três elementos tratados neste capítulo, o que representa o maior componente no custo de adubação. Conforme destacado anteriormente, é o nutriente extraído em maiores quantidades pelas culturas

e requer especial atenção quanto à sua reposição via adubação. As adubações potássicas devem, no mínimo, se equivaler às quantidades exportadas pelas colheitas, sob risco de exaustão das reservas naturais do solo, porquanto os solos brasileiros apresentam reservas limitadas do nutriente. Embora em algumas situações não se observe resposta à adubação potássica, a falta de reposição leva à insustentabilidade do sistema de produção. Outro aspecto importante a ser considerado é a forte dependência brasileira da importação de potássio. Em momentos críticos de demanda, o preço dos fertilizantes potássicos pode atingir valores proibitivos, inviabilizando a produção agrícola. Diante desta situação, a melhor estratégia é manter sempre uma reserva do nutriente no solo.

O ponto-chave para o manejo do potássio em sistemas agrícolas passa pelo controle dos fatores relacionados às perdas por lixiviação e por erosão. Várias opções podem ser adotadas, como técnicas mecânicas de controle de erosão, manutenção da cobertura do solo com palhada e uso de plantas recicladoras em rotação com culturas comerciais. Existe uma grande flexibilidade em relação à melhor época de aplicação dos fertilizantes potássicos para a reposição das quantidades extraídas. A escolha da melhor época deve visar a redução das perdas, permitindo a rápida absorção pelas plantas do potássio aplicado. Deve-se evitar a aplicação de fertilizantes potássicos em solos desprotegidos na época chuvosa, especialmente em solos arenosos ou com alta declividade. Em solos arenosos, sempre que possível, deve-se proceder ao parcelamento da adubação.

A aplicação de doses elevadas de fertilizante potássico no sulco de semeadura pode ocasionar problemas no crescimento das plântulas, sobretudo em condições de estresse hídrico. A adubação potássica em taxa variável pode resultar em economia significativa de fertilizantes em solos com fertilidade construída. Em alguns casos, recomenda-se uma adubação de base em dose homogênea com fórmula de baixo teor de potássio (30% a 50% da dose de manutenção), associada a uma aplicação complementar a lanço, em quantidades suficientes para repor o potássio extraído pela cultura e manter o teor no solo acima do nível crítico. A aplicação a lanço pode ser feita antes da implantação da cultura comercial ou em cobertura, até cerca de 20 dias antes do início da fase reprodutiva.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. *Interpretação dos resultados das análises de solos*. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-VENEGAS, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25–36.
- AMABILE, R. F.; FANCELLI, A. L.; CARVALHO, A. M. Absorção de N, P e K por espécies de adubos verdes cultivadas em diferentes épocas e densidades num Latossolo Vermelho-Escuro argiloso sob cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 837–845, 1999.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 4, p. 695–702, 2001.
- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2008.
- ANDRADE, L. A. B. Calagem para a cultura da cana-de-açúcar. **Informativo Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 15, p. 15–18, 1991.
- ANDREOTTI, M.; RODRIGUES, J. D.; CRUSCIOL, C. A. C.; SOUZA, E. C. A.; BÜLL, L. T. Crescimento do milho em função da saturação por bases e da adubação potássica. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 145–150, 2001.
- ARAÚJO, C. A. S.; RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; SILVA, D. J.; CARVALHO, M. A. Transporte de fósforo e de potássio em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 259–268, 2000.
- BENITES, V. M.; TANNUS, V. R.; MENEZES, J. F. S.; SIMON, G. A.; COSTA, K. A. P.; MARTINS, E. S. **Avaliação da capacidade de extração de nutrientes por plantas de cobertura adubadas com pó de rocha obtido a partir da brecha alcalina de Santo Antônio da Barra-Go**. Goiânia: Centro Tecnológico COMIGO, 2009.
- BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. P.; LEANDRO, W. M.; MESQUITA, T. G. S.; FREITAS, P. L.; CARVALHO, M. C. S. Doses

e formas de aplicação da adubação potássica na rotação soja, milho e algodão em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 158–167, 2009.

BERTOL, I.; GUADAGNIN, J. C.; CASSOL, P. C.; AMARAL, A. J.; BARBOSA, F. T. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um Inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 485–494, 2004.

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 9, p. 1269–1276, 2007.

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na Região Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 843–851, 2008.

BORKERT, C. M.; GAUDÊNCIO, C. A.; PEREIRA, J. E.; PEREIRA, L. R.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 1, p. 143–153, 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 21, de 16 de abril de 2008. Altera a Instrução Normativa nº 5 de 23/02/2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 abr. 2008. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultarLegislacao.do?operacao=visualizar&id=18587>>. Acesso em: 14 jan. 2010.

BRUNETTO, G.; GATIBONI, L. C.; SANTOS, D. R.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 565–571, 2005.

BRUULSEMA, T.; LEMUNYON, J.; HERZ, B. Fundamentos para a utilização correta do seu fertilizante. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 126, p. 15–18, 2009.

BÜLL, L. T.; BOARETTO, A. E.; MELLO, F. A. F.; SOARES, E. Influência da relação K/(Ca+Mg) do solo na produção de matéria seca e na absorção de potássio por gramínea e leguminosa forrageiras: II. Absorção de potássio em função da relação K/(Ca+Mg) no complexo de troca do solo. **Científica**, Jaboticabal, v. 21, n. 1, p. 67–75, 1993.

BÜLL, L. T.; VILLAS BOAS, R. L.; NAKAGAWA, J. Variações no balanço catiônico do solo induzidas pela adubação potássica na cultura do alho vernalizado. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 456–464, 1998.

CAIRES, E. F.; BANZATO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 161–169, 2000.

CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSELEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estágios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 99–108, 2005.

CARPIM, L. K.; ASSIS, R. L.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R.; PEREIRA, V. C.; GOMES, G. V.; SILVA, A. G. Liberação de nutrientes pela palhada de milho em diferentes estágios fenológicos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. especial, p. 2813–2819, 2008.

CARVALHO, M. C. S.; BARBOSA, K. A. **Resposta do algodoeiro a doses e épocas de adubação potássica em solo de baixa fertilidade no cerrado de Goiás**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2003. (Embrapa Algodão. Comunicado Técnico, 200).

CARVALHO, M. C. S.; BERNARDI, A. C. C.; FERREIRA, G. B. O potássio na cultura do algodoeiro. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 393–404.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; CARVALHO, O. S.; SILVA, O. R. R. F.; MEDEIROS, J. C. Nutrição, calagem e adubação. In: BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, D. M. P. (Org.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v. 2. p. 679–789.

CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 192, no. 1, p. 37–48, 1997.

CASSOL, E. A.; LEVIEN, R.; ANGHINONI, I.; BADELUCCHI, M. P. Perdas de nutrientes por erosão em diferentes métodos de melhoramento de pastagem nativa no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 705–712, 2002.

- CASTILHOS, R. M.; MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; PINTO, L. F. S. Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 579–587, 2002.
- CASTRO, O. M. Sistemas conservacionistas no Brasil: a experiência de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993, Goiânia. **Resumos...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. v. 1. p. 77–78.
- COELHO, M. A. O.; SEDIYAMA, T.; SOUZA, M. A.; RIBEIRO, A. C.; SEDIYAMA, C. S. Composição mineral e exportação de nutrientes pelos grãos do trigo irrigado e submetido a doses crescentes e parceladas de adubo nitrogenado. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 48, n. 275, p. 81–94, 2001.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Central de informações agropecuárias**. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=101>>. Acesso em: 31 jan. 2010.
- CRUSCIOL, C. A. C.; ARF, O.; SORATTO, R. P.; MACHADO, J. R. Influência de lâminas de água e adubação mineral na nutrição e produtividade de arroz de terras altas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 647–654, 2003.
- DIEROLF, T. S.; ARYA, L. M.; YOST, R. S. Water and cation movement in an Indonesian Ultisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, no. 4, p. 572–579, 1997.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro: CNPS, 1978. (Boletim Técnico, 53).
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: CNPS, 1998. (Boletim de Pesquisa, 6).
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2009 e 2010**. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 13).

- ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A.; CASSOL, P. C. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 393–402, 2007.
- ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; RAMPAZZO, C. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num Nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 993–1000, 2002.
- FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por bases em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 416–424, 2001.
- FAO. Food and Agriculture Organization. **Guide to efficient plant nutrition management**. Rome, 1998.
- FAQUIN, V.; FERRARI NETO, J.; EVANGELISTA, A. R.; VALE, F. R. Limitações nutricionais do colônio (*Panicum maximum*, Jacq) e da braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf), em amostras de um latossolo do noroeste do Paraná: II. Nutrição em macro e micronutrientes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 23, n. 4, p. 552–564, 1994.
- FIGUEIREDO, G. C. **Movimentação de cálcio de diferentes fontes adicionadas em colunas de dois Latossolos**. 2006. 72 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1549–1561, 2008.
- FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas em solos ácidos após aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 3, p. 533–542, 1999.
- FRANCISCO, E. A. B.; CÂMARA, G. M. S.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 66, n. 2, p. 259–266, 2007.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 28, no. 4, p. 579–585, 2008.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HÜBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 9, p. 1097–1104, 2003.

HIROCE, R.; FURLANI, A. M. C.; LIMA, M. **Extração de nutrientes na colheita por populações e híbridos de milho**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 1989. (Boletim Científico, 17).

HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S.; HIGASHIKAWA, F. S. Otimização da adubação em lavouras com altos teores de potássio no solo: uso de agricultura de precisão. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Anais...** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009.

ISHERWOOD, K. F. **Fertilizer use and the environment**. Paris: International Fertilizer Industry Association, United Nations Environment Programme Industry and the Environment, 1998.

ISHIGURO, M.; SONG, K. C.; YUITA, K. Ion transport in an Allophanic Andisol under the influence of variable charge. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, no. 6, p. 1789–1793, 1992.

JAKOBSEN, S. T. Nutritional disorders between potassium, magnesium, calcium, and phosphorus in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 154, no. 1, p. 21–28, 1993.

JOHNSTON, A. E. Potassium, magnesium and soil fertility: long term experimental evidence. In: MAGGEN, H. (Ed.). **Potassium and magnesium: advances in research and application**. York: International Fertiliser Society, 2007. p. 172–208.

JOHNSTON, A. E. **The efficient use of plant nutrients in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2000.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1003–1010, 2007.

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, no. 2, p. 259–265, 2007.

LANA, R. M. Q.; VILELA FILHO, C. E.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; PEREIRA, H. S.; LANA, A. M. Q. Adubação superficial com fósforo e potássio para a soja em diferentes épocas em pré-semeadura na instalação do sistema de plantio direto. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 4, n. 1–2, p. 53–60, 2003.

LIMA, J. A.; DEFELIPO, B. V.; NOVAIS, R. F.; THIÉBAUT, J. T. L. Efeito das relações Ca/Mg e (Ca+Mg)/K na correção da acidez de dois Latossolos e na produção de matéria seca do tomateiro (*Lycopersicon esculentum*, Mill) cv. ‘Kada’. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 28, n. 156, p. 103–115, 1981.

LOPES, A. S. Recomendação de calagem e adubação no sistema plantio direto. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ-VELEGAS, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 93–98.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997.

MARIA, I. C.; ROSSETTO, R.; AMBROSANO, E. J.; CASTRO, O. M. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 1, p. 87–98, 1993.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.

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 SP: Instituto Agrônomo, 1987. (Boletim Técnico IAC, 199).

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; CARMELLO, Q. A. C.; GALLO, P. B.; AMBROSANO, G. M. B. Calcário e potássio para a cultura de soja. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 445–449, 2000.

MATOS, M. A.; SALVI, J. V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 493–501, 2006.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; DALLA ROSA, J.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio:magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 4, p. 799–806, 2008.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do triângulo mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 807–819, 2003.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 2, p. 269–284, 2000.

MENEZES, J. F. S.; BENITES, V. M.; OLIVEIRA, A. K. **Lixiviação de cálcio, magnésio e potássio em um Latossolo Vermelho submetido a adubação com dejetos líquidos de suínos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. No prelo. (Série Documentos).

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

MEURER, E. J.; CASTILHOS, R. M. V. Liberação de potássio de frações de solos e sua cinética. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 4, p. 823–829, 2001.

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

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005. p. 165–178.

MOREIRA, A.; CARVALHO, J. G. de; EVANGELISTA, A. R. Influência da relação cálcio:magnésio do corretivo na nodulação, produção e composição mineral da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 2, p. 249–255, 1999.

MYIAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 92, 2000. (Encarte técnico).

OLIVEIRA, E. L. Rendimento de matéria seca e absorção de cálcio e magnésio pelo milho em função da relação cálcio/magnésio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 17, n. 3, p. 383–388, 1993.

OLIVEIRA, E. L.; PARRA, M. S. Resposta do feijoeiro a relações variáveis entre cálcio e magnésio na capacidade de troca de cátions de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 859–866, 2003.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, no. 1–2, p. 47–57, 1996.

OLIVEIRA, F. A.; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 329–335, 2001.

OLIVEIRA, F. A.; SILVA, J. J. S.; VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. Doses e métodos de aplicação de potássio na soja em solo dos cerrados da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 11, p. 1485–1495, 1992.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ-VENEGAS V. H.; CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S. S.; ALVAREZ-VENEGAS, V. H. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. v. 2. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 393–486.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 1993. (Série Documentos, 27).

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 439–445, 2004.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, no. 1, p. 33–38, 1984.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1992. (Circular, 76).

PÖTTKER, D. Correção da acidez do solo no sistema de plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Anais...** Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1998. p. 43–52. (EMBRAPA-CPAO. Documentos, 22).

PRADO, R. B.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; POLIDORO, J. C.; DART, R. O.; NAUMOV, A. Mapping potassium availability from limited soil profile data in Brazil. In: HARTEMINK, A.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Ed.). **Digital soil mapping with limited data**. New York: Springer, 2008. p. 91–101.

PRADO, R. B.; BENITES, V. M.; TURETTA, A. P.; BALIEIRO, F.; POLIDORO, J. C. **Disponibilidade natural de cálcio e magnésio nos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, no prelo. (Série Documentos).

PRATT, P. F. Potassium. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. v. 1. p. 1022–1032.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas, SP: Instituto Agronômico, 2000.

QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O. C. Resposta da soja a aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo roxo distrófico de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 6, n. 1, p. 113–118, 1982.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 1981.

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

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**, New York, v. 17, no. 5, p. 547–566, 1986.

RESENDE, A. V.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, G. C.; SENA, M. C.; MACHADO, C. T. T.; KINPARA, D. I.; OLIVEIRA FILHO, E. C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “in natura” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, Brasília, DF, v. 9, n. 1, p. 19–42, 2006.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F. M. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 2, p. 263–268, 2000.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 133, no. 6, p. 378–382, 1982.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; SOUSA, D. M. G. Relação entre teor de cálcio e desenvolvimento de raízes avaliado por um método biológico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 7, n. 3, p. 269–275, 1983.

RÖMHELD, V.; KIRKBY, E. A. Magnesium functions in crop nutrition and yield. In: MAGGEN, H. (Ed.). **Potassium and magnesium: advances in research and application**. York: International Fertiliser Society, 2007. p. 151–171.

ROSOLEM, C. A. Adubação potássica em semeadura direta. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Anais...** Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1998. p. 1–12. (EMBRAPA-CPAO. Documentos, 22).

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 355–362, 2003.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINGHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 1443–1448, 1984.

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**, Campinas, SP, v. 12, n. 1, p. 121–125, 1988.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; UFLA/DCS, 1999. p. 267–319.

SABINO, N. P.; SILVA, N. M.; SABINO, J. C.; KONDO, J. I. Efeito do parcelamento da adubação potássica nas características agrônomicas e propriedades tecnológicas da fibra do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 43, n. 1, p. 221–228, 1984.

SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 9, n. 1, p. 45–50, 1985.

SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KÄMPF, 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, SP, v. 19, n. 3, p. 433–439, 1995.

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, SP, v. 12, p. 137–142, 1988.

SILVA, N. M.; CARVALHO, L. H.; CIA, E.; CHIAVEGATO, E. J.; SABINO, N. P. Estudo do parcelamento da adubação potássica do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 43, n. 1, p. 111–124, 1984.

SILVA, N. M.; FUZZATO, M. G.; CHIAVEGATO, E. J.; FERRAZ, C. A. M.; HIROCE, R. Adubação potássica do algodoeiro: época, modo de aplicação e tipo de fertilizante. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 44, n. 1, p. 263–274, 1985.

SILVA, R. H.; ROSELEM, C. A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 10, p. 1269–1275, 2001.

SIMONETE, M. A.; VAHL, L. C.; FABRES, R. T.; COUTO, J. R. R.; LUNARDI, R. Efeito residual da adubação potássica do azevém sobre o arroz subsequente em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 721–727, 2002.

SIMSON, C. R.; COREY, R. B.; SUMNER, M. E. Effect of varying Ca:Mg ratios on yield and composition of corn (*Zea mays*) and alfalfa (*Medicago sativa*). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 10, no. 1–2, p. 153–162, 1979.

SOUSA, D. M. G. Manejo da fertilidade do solo sob cerrado com ênfase em plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Anais...** Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1998. p. 53–58. (EMBRAPA-CPAO. Documentos, 22).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.

SPARKS, D. L. Potassium dynamics in soils. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in soil sciences**. v. 6. New York: Springer-Verlag, 1987. p. 1–61.

STEVENS, G.; GLADBACH, T.; MOTAVALLI, P.; DUNN, D. Soil calcium:magnesium ratios and lime recommendations for cotton. **Journal of Cotton Science**, Baton Rouge, v. 9, no. 1, p. 65–71, 2005.

TASSO JUNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; CAMILOTTI, F.; SILVA, T. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região centro-norte do estado de São Paulo. **STAB**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 6–8, 2007.

TEIXEIRA, C. M.; CARVALHO, G. J. C.; FURTINI NETO, A. E.; ANDRADE, M. J. B.; MARQUES, E. L. S. Produção de biomassa e teor de macronutrientes do milheto, feijão-de-porco e guandu-anão em cultivo solteiro e consorciado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p. 93–99, 2005.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. New York: MacMillan, 1993.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1609–1618, 2008.

VENTURA, C. A. O.; DECHEN, A. R.; CARMELLO, Q. A. C.; HAAG, H. P. Níveis de potássio, cálcio e magnésio em solução nutritiva influenciando o crescimento e a composição química da soja, var. Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., 1987, Campinas, SP. **Resumos...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1987. p. 98–99.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 169–183.

VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 649–658, 2004.

VITOSH, M. L.; JOHNSON, J. W.; MENGEL, D. B. **Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat & alfalfa**. East Lansing: Michigan State University, The Ohio State University, Purdue University, 1995. (Extension Bulletin, E- 2567). Disponível em: <<http://www.ces.purdue.edu/extmedia/AY/AY-9-32.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2009.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2297–2305, 2008.

WIETHÖLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando trigo como referência. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 1011–1021, 2007.