

EFICIÊNCIA DE FOSFATOS NATURAIS RELACIONADA À PRODUTIVIDADE DE MILHETO EM SOLOS DE CERRADO¹

Elihu de Almeida Santos² e Huberto José Kliemann³

ABSTRACT

AGRONOMIC EFFICIENCY OF ROCK PHOSPHATES ON MILLET YIELD IN SAVANNAH SOILS

A greenhouse experiment was undertaken to assess the agronomic efficiency of rock phosphates in five savannah soils. Standard response curves (0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹, 200 kg ha⁻¹, 400 kg ha⁻¹, and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) with triple superphosphate (TSP) were used, including two rates (200 kg ha⁻¹ and 800 kg ha⁻¹ of P₂O₅) of alternative phosphate sources (Arad phosphorite – Israel, phosphoric bauxite – Senegal, and Araxá apatite – Brazil). Millet (*Pennisetum thyphoides*) was used as test crop. Data show the following ranking for agronomic efficiency: phosphorite > bauxitic phosphate > apatitic phosphate. Mehlich-1 extractant solubilizes apatitic phosphates, over-estimating the available phosphorus (P) in soils. Critical levels for Mehlich-1 and resin extractants, to which data of available phosphorus from natural phosphate treatments have been added, differed among each other, but were higher than those obtained with triple superphosphate alone. The extractants behaved in a similar way as related to the extraction of soil available P.

KEY WORDS: rock phosphates, performance, savannah, millet.

RESUMO

Um experimento em estufa foi realizado para avaliar a eficiência agrônômica de três fosfatos naturais, em cinco solos da região dos cerrados. Construíram-se curvas de resposta padrão (0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹, 200 kg ha⁻¹, 400 kg ha⁻¹ e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) com superfosfato triplo (ST), incluindo duas doses (200 kg ha⁻¹ e 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅) das fontes de fosfatos alternativos (fosforita de Arad – Israel, fosfato de alumínio e cálcio – Senegal, e apatita de Araxá – Brazil). Usou-se o milheto (*Pennisetum thyphoides*) como planta-teste. A ordem de eficiência dos fosfatos naturais aplicados aos solos utilizados neste estudo foi a seguinte: fosforita > fosfato de alumínio e cálcio > apatita. O extrator Mehlich-1 solubilizou os fosfatos apatíticos, super-estimando o fósforo (P) disponível nos solos. Os níveis críticos para os extratores Mehlich-1 e resina, aos quais foram adicionados dados do fósforo (P) disponível nos tratamentos com fosfatos naturais, diferiram entre si, mas, foram mais altos do que os obtidos com o superfosfato triplo isoladamente. Os dois extratores comportaram-se de modo similar, com respeito à extração de P disponível no solo.

PALAVRAS-CHAVE: fosfatos naturais, desempenho, cerrado, milheto.

INTRODUÇÃO

Dos elementos essenciais à vida das plantas, o fósforo (P) tem sido um dos mais limitantes na região dos cerrados, devido, principalmente, à sua alta capacidade de adsorção (fixação) de fósforo. Para reduzir a fixação do fósforo no solo, têm-se usado fosfatos naturais insolúveis em água, com liberação gradual do elemento, melhorando a eficiência de sua utilização pelas culturas.

As fontes de fósforo dividem-se nas formas lábil e não lábil, sendo que a primeira se transforma,

com o passar do tempo, na forma não lábil, constituindo o P imobilizado. Para reduzir a adsorção de fósforo pelo solo, têm-se utilizado fosfatos naturais que são insolúveis em água, com liberação gradual do elemento na solução do solo, melhorando a eficiência de sua utilização pelas culturas. Várias tecnologias, desenvolvidas por instituições como o Instituto Agrônômico (IAC), as universidades federais de Viçosa (UFV), Lavras (UFLA) e Goiás (UFG), a Emgopa e a Embrapa Cerrados, têm contribuído para melhorar essa eficiência (Goedert 1985). No entanto,

1. Parte da tese de doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal de Goiás.

Trabalho recebido em dez./2004 e aceito para publicação em abr./2006 (registro nº 613).

2. Fundação de Ensino Superior de Rio Verde (Fesurv), Caixa Postal 104, CEP 75900-000 Rio Verde, GO. E-mail: elihu@fesurv.br

3. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás. CEP 74001-970. E-mail: kliemann@agro.ufg.br

a necessidade de maximização da eficiência dos fosfatos aplicados continua a requer mais estudos, visto que as reservas fosfáticas são escassas e não renováveis. Estes fosfatos, também denominados de reativos, vêm sendo pesquisados no mundo inteiro e têm, em algumas situações, mostrado eficiência semelhante ao superfosfato triplo.

As rochas fosfáticas utilizadas para aplicação direta na agricultura têm sido as apatitas e fosforitas e, com menor nível de utilização, as bauxitas fosfóricas. As apatitas são de origem vulcânica, com 4% a 5% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico e com teores de P_2O_5 total variando de 28% a 30%. É um mineral formado essencialmente de fosfato tricálcico e sua solubilidade está diretamente associada ao grau de cristalização, que é tanto menor quanto mais fluoretada for a apatita (Kliemann & Lima 2001). As fosforitas, de origem orgânica ou sedimentar (Gafsa, Daoui, Arad, Carolina do Norte), apresentam estrutura microcristalina pobremente consolidada e com grande superfície específica. A substituição isomórfica do PO_4^{3-} pelo CO_3^{2-} (aumento do número de mols de CO_3^{2-} por mol de apatita) resulta em maior reatividade da rocha fosfática.

As rochas fosfáticas sedimentares possuem menor ou maior grau de reatividade, dependendo do nível de substituição isomórfica (Khasawneh & Doll 1978) e, segundo León *et al.* (1986), podem ser classificadas em quatro categorias de reatividade ou eficiência: alta (Tunísia – Gafsa, Israel – Arad, Peru – Sechura, e USA – Carolina do Norte), média (advindas do centro da Flórida e USA – Tennessee, Colômbia – Pesca e Huila), baixa (Patos de Minas – Abaeté) e muito baixa (Jacupiranga, Catalão e Tapira).

Para avaliar a capacidade potencial de uma fonte fosfatada na liberação do P disponível para as plantas, são utilizados vários índices como solubilidade em ácido cítrico a 2%, o equivalente em superfosfato triplo (EqST) e o índice de eficiência agrônômica (IEA). Os índices são calculados em relação a uma fonte padrão, geralmente o superfosfato triplo, com a fonte a ser testada, partindo-se do pressuposto de que a quantidade do P nativo do solo absorvido pelas plantas independe da dose de adubo aplicada.

Korndörfer *et al.* (1998), em trabalho desenvolvido em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVd) de cerrado, verificaram que os poderes de suprimento de fósforo pelos fosfatos de Arad, Marrocos e Gafsa, para a cultura do milho, foram de 60%, 80% e 97%, respectivamente, quando comparados ao superfosfato triplo. Na cultura da soja, com

aplicação de fosfatos naturais de diferentes procedências, Goedert *et al.* (1985) relatam que a variação nos índices de EqST de 15% até 103% foi totalmente dependente do ambiente de formação e da origem geológica dos fosfatos.

Para minimizar os custos de produção têm-se utilizado os fosfatos naturais reativos associados com uma fonte solúvel, geralmente o superfosfato simples ou monoamônio fosfato (MAP). O uso de fosfatos naturais, mesmo com inúmeras restrições, tem como vantagem seu maior efeito residual pela lenta liberação de P disponível para o complexo sortivo do solo (Coutinho *et al.* 1991).

Neste trabalho avaliou-se, em condições de casa de vegetação, o desempenho de três fosfatos naturais na disponibilidade de fósforo para as plantas, em cinco solos de cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi realizado em casa de vegetação, na Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, com os solos: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), proveniente do município de Leopoldo de Bulhões; Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico (PVAe), do município de São Luiz de Montes Belos; Latossolo Vermelho distrófico (LVd), do município de Rio Verde; Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), do município de Acreúna; e Neossolo Quartzarênico distrófico (RQo), do município de Caçu. As análises químicas e físicas são apresentadas na Tabela 1.

Amostras de 3,0 kg de solo seco ao ar, tomadas de cada tipo de solo, foram colocadas em vasos. Empregou-se o delineamento inteiramente casualizado,

Tabela 1. Caracterização química e física dos solos¹ estudados, identificados também por suas procedências (municípios do Estado de Goiás, Brasil).

Atributos dos solos	Solos				
	Leopoldo de Bulhões (LVAd)	São Luiz de Montes Belos (PVAe)	Rio Verde (LVd)	Acreúna (LVdf)	Caçu (RQo)
<i>Químicos</i>					
pH em $CaCl_2$	4,3	5,4	5,1	4,6	4,1
pH em água ¹	5,9	6,0	5,7	5,6	5,6
P Mehlich-1 ($mg\ dm^{-3}$)	0,4	0,8	2,1	2,1	1,3
P resina ($mg\ dm^{-3}$)	2,6	4,2	2,9	2,4	2,7
K ($mg\ dm^{-3}$)	30	150	103	60	18
Ca ($mmol\ dm^{-3}$)	8	74	56	29	12
Mg ($mmol\ dm^{-3}$)	3	14	11	9	3
Al ($mmol\ dm^{-3}$)	2	0	0	3	2
H+ Al ($mmol\ dm^{-3}$)	59	23	43	68	37
T ($mmol\ dm^{-3}$)	71	115	113	108	55
m (%)	14,6	0,0	0,0	7,0	11,5
V (%)	16,6	79,9	61,8	36,7	33,0
Matéria orgânica ($g\ kg^{-1}$)	39	41	80	41	13
Necessidade de calagem	2,9	—	—	2,4	1,5
<i>Físicos</i>					
Areia ($g\ kg^{-1}$)	350	500	380	200	830
Silte ($g\ kg^{-1}$)	200	180	260	220	50
Argila ($g\ kg^{-1}$)	440	320	360	580	120

¹ - Determinações feitas após a colheita do experimento.

com rodízio aleatório dos vasos. Os tratamentos constaram dos cinco tipos de solo, quatro fontes de fósforo e cinco doses de P_2O_5 (0 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹, 200 kg ha⁻¹, 400 kg ha⁻¹ e 800 kg ha⁻¹) para a fonte solúvel (ST – superfosfato triplo), e duas doses (200 kg ha⁻¹ e 800 kg ha⁻¹) para as fontes alternativas (fosfatos naturais). Foram utilizadas três repetições por solo. A planta-teste foi o milho (*Pennisetum thyphoides*), cujo plantio ocorreu em 02/maio/2003 e a colheita em 07/jun./2003, com dez plantas por vaso. A irrigação foi controlada pela perda de peso dos vasos, mantendo-se a umidade próxima a 80% da capacidade de campo.

Os resultados das análises dos fosfatos utilizados estão na Tabela 2. A adubação básica foi feita com 240 mg kg⁻¹ de N, na forma de uréia; 150 mg kg⁻¹ de K na forma de KH_2PO_4 , complementados com KCl; 50 mg kg⁻¹ de S na forma de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; e micronutrientes: Mo, 0,1mg kg⁻¹, na forma de $NH_4Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$; B, 0,5 mg kg⁻¹ na forma de H_3BO_3 ; Zn, 5 mg kg⁻¹ na forma de $ZnCl_2$; Fe, 10 mg kg⁻¹ na forma de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$; e Mn, 5 mg kg⁻¹ na forma de $MnCl_2 \cdot 4H_2O$. A necessidade de calagem (t ha⁻¹) dos solos foi determinada pela saturação, usando-se valores de V iguais a 60%, pela metodologia de Raij & Quaggio (1983).

Para estimar os teores do P disponível no solo, utilizaram-se os extratores de Mehlich-1 e resina de troca aniônica (Nelson *et al.* 1953, Raij *et al.* 1986, Embrapa 1997). Os teores de P total da parte aérea foram determinados de acordo com a metodologia descrita em Malavolta *et al.* (1997).

Equações de regressão para a produção relativa de massa seca de milho foram estimadas pelo modelo polinomial inverso de primeiro grau e pelo modelo polinomial de segundo grau, utilizando-se o aplicativo computacional Sigmaplot 2000 (Jandel Scientific 1999). Os índices de eficiência agrônômica foram baseados em curva de resposta de massa seca e doses de fosfato, em cada solo, de acordo com a expressão de Barnes & Kamprath (1975):

$$IEA(\%) = \frac{P_i - P_0}{P_{SFT} - P_0} \times 100$$

Tabela 2. Teores de P_2O_5 (g kg⁻¹) das fontes de fósforo utilizadas no experimento

Fontes de fósforo	Totais	Solúveis em ácido cítrico a 2%
		g kg ⁻¹
Superfosfato triplo (ST)	464,0	434,0
Fosfato de Araxá (Brasil)	378,1	43,5
Fosfato de Arad (Israel)	312,0	112,0
Fosfato de alumínio e cálcio	328,1	-

em que: IEA é o índice de eficiência agrônômica; P_i , a produção de massa seca nas doses de 200 kg ha⁻¹ e 800 kg ha⁻¹ de P_2O_5 ; P_0 , a produção de massa seca na ausência de P; e P_{SFT} , a produção de massa seca, estimada pela curva média de resposta às doses crescentes de superfosfato triplo, nas doses consideradas de P_2O_5 .

Para estimar a eficiência de acumulação de fósforo pelo milho, empregou-se a expressão de Baligar *et al.* (1990):

$$IRAF(\%) = \frac{P_a - P_t}{D_a} \times 100$$

em que: IRAF é o índice relativo de acumulação de fósforo; P_a , o P absorvido com a dose considerada de fósforo aplicado; P_t , o P absorvido pela testemunha; e D_a , a dose aplicada.

Para estabelecer o nível crítico do P disponível nos solos, utilizou-se o critério de 75% da produção relativa da massa seca do milho e da acumulação relativa de P.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de massa seca da parte aérea

As produções estimadas de massa seca da parte aérea do milho, relacionadas à aplicação do superfosfato triplo (ST), descritas pelo modelo polinomial de segundo grau, proporcionaram acréscimos decrescentes (Tabela 3). As produções de massa seca de milho, relativas ao ST na dose de 800 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , acusaram decréscimos seme-lhantes entre fosfatos naturais, que variam de 16% a 23% no fosfato de Arad, de 20% a 48% no Phospal, e de 47% a 84% no fosfato de Araxá. O melhor desempenho dos dois primeiros fosfatos, ambos de origem sedimentar, pode ser atribuído à sua maior solubilidade, como foi verificado por Khasawneh & Doll (1978). A diferença observada no índice de eficiência agrônômica (IEA) das rochas fosfáticas (Tabela 4) está relacionada com o ambiente de formação e a mineralogia destas rochas, o que está de acordo com os resultados de León *et al.* (1986). Esses autores verificaram que os altos índices médios de eficiência agrônômica encontrados para as fosforitas se justificam por estas apresentarem estrutura microcristalina, pobremente consolidada e com grande superfície específica.

Os índices médios de eficiência da apatita de Araxá (Tabela 4), considerados baixos, são atribuídos

Tabela 3. Produção de massa seca da parte aérea do milho (g. vaso⁻¹) em função de doses aplicadas de superfosfato triplo e das fontes fosfatadas Arad, Araxá e Phospal nas classes de solos estudados, identificados também por sua procedência.

Fontes de fósforo	Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Solos				
		Leopoldo de Bulhões (LVAd)	São Luiz M. Belos (PV Ae)	Rio Verde (LVd)	Acreúna (LVdf)	Caçu (RQo)
Superfosfato triplo	0	10,60	15,80	17,00	17,10	18,40
	100	27,70	31,73	33,83	34,83	30,10
	200	29,20	34,53	34,47	35,33	31,60
	400	31,50	35,50	35,13	36,17	34,23
	800	34,50	37,03	36,83	39,07	39,80
Fosfato de Arad	200	23,10	29,00	30,50	28,60	28,53
	800	30,00	32,00	29,50	32,67	31,50
Fosfato de Araxá	200	15,90	22,50	21,20	23,40	22,40
	800	20,20	20,00	21,00	23,50	26,40
Phospal	200	21,20	27,00	26,10	28,50	26,50
	800	23,50	26,00	27,40	29,80	32,60

ao alto grau de cristalinidade, que é tanto maior quanto mais fluoretada for a rocha fosfática (Goedert 1985). Também merece destaque a baixa solubilidade em ácido cítrico a 2% (Tabela 2) que, segundo Braga *et al.* 1991, é um atributo que relaciona a capacidade da rocha fosfática em fornecer P disponível equivalente à fonte solúvel. Resultados semelhantes foram obtidos por Couto *et al.* (1989) e Kliemann & Lima (2001). O fosfato de alumínio e cálcio (Phospal) ocupou uma posição intermediária, com 58%, concordando com os dados de Braga *et al.* (1991), que a consideram apenas moderada.

As concentrações de P na parte aérea do milho, para todos os solos estudados, independentemente da fonte, foram diretamente proporcionais aos aumentos nas doses de P aplicados (Tabela 5). As doses de fósforo aplicadas como ST resultaram em maior concentração de P na parte aérea, quando comparado às fontes alternativas. A concentração de P nas folhas obedeceu ao critério decrescente de solubilidade destes fosfatos, avaliado pelos índices médios de eficiência agrônômica de 71%, 58% e 30,2%, nos cinco solos estudados, respectivamente para os fosfatos de Arad, Phospal e fosfato de Araxá (Tabela 4).

Níveis críticos de P disponível nos solos

Os dois extratores de P disponível no solo apresentaram os mesmos coeficientes de correlação ($r = -0,95$) na avaliação da fonte solúvel (ST), indicando que possuem eficiência similar, embora com valores diferenciados (Tabela 6). A partir das equações de regressão calcularam-se os níveis críticos do P disponível, estimados em 7,3 mg dm⁻³ e 7,8 mg dm⁻³ de P pelos extratores Mehlich-1 e resina, respectivamente, usando o critério de 75% da produção relativa. Esses resultados são indicativos

Tabela 4. Índices de eficiência agrônômica (IEA) de fontes de fosfatos não solúveis em solos da região dos cerrados, identificados também por suas procedências.

Solos	Arad			Araxá			Phospal		
	200 ¹	800 ¹	média	200 ¹	800 ¹	média	200 ¹	800 ¹	Média
Leopoldo Bulhões (LVAd)	65,0	84,0	74,5	28,0	41,0	34,5	55,0	56,0	55,5
São Luiz M. Belos (PV Ae)	71,0	78,0	74,5	36,0	20,0	28,0	61,0	49,0	55,0
Rio Verde (LVd)	75,0	66,0	70,5	23,0	21,0	22,0	51,0	55,0	53,0
Acreúna (LVdf)	61,0	74,0	67,5	34,0	30,0	32,0	61,0	60,0	60,5
Caçu (RQo)	64,0	72,0	68,0	25,0	44,0	34,5	51,0	78,0	64,5

¹- Doses de P₂O₅ (kg ha⁻¹) usadas para calcular os índices de eficiência agrônômica.

de que a resina extrai quantidades de P ligeiramente maiores que o extrator ácido, como atestaram também Silva & Rajj (1996) e Miranda *et al.* (2002).

Com a inclusão das fontes fosfatadas (fosforita de Arad, fosfato de alumínio e cálcio e apatita de Araxá), nota-se que os níveis críticos foram significativamente alterados em função das características de solubilidade destes produtos (em ácido cítrico a 2%), do índice de eficiência agrônômica (IEA), da composição química dos extratores e dos atributos do solo. A correlação altamente significativa entre a produção relativa de massa seca da parte aérea do milho e o P extraído pelo método Mehlich-1, com a inclusão do fosfato natural de Arad, é compatível com o seu índice de eficiência agrônômica (Tabela 4), com nível crítico de 9,2 mg dm⁻³ de P. Este valor é próximo ao estimado com a fonte solúvel isolada, isto é, de 7,3 mg dm⁻³ de P.

Nos tratamentos com aplicação de fosfato de alumínio e cálcio (Phospal), os extratores Mehlich-1 e resina comportaram-se de forma semelhante, com igual coeficiente de correlação ($r = -0,83$) e nível crítico médio de 10,7 mg dm⁻³ de P. Os coeficientes de correlação menores, embora significativos, obtidos com a inclusão do fosfato de Araxá nas equações de regressão (Tabela 6) são compatíveis com os índices de eficiência agrônômica (Tabela 4). Apesar de o método da resina extrair maior quantidade de P pela aplicação da fonte solúvel, esta tendência não se

Tabela 5. Concentração de P na parte aérea do milho (g. kg⁻¹) em função de fontes e doses de P₂O₅ aplicadas a cinco solos, identificados também por suas procedências.

Fontes de fósforo	Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Solos				
		Leopoldo de Bulhões (LVAd)	São Luiz M. Belos (PV Ae)	Rio Verde (LVd)	Acreúna (LVdf)	Caçu (RQo)
Superfosfato triplo	0	1,54	2,12	1,44	2,16	1,47
	100	3,12	3,37	2,41	3,20	2,39
	200	3,95	6,68	5,62	3,45	2,63
	400	4,42	8,26	7,61	4,16	2,71
	800	4,93	8,56	9,73	5,75	3,59
Fosfato de Arad	200	2,43	7,82	3,91	4,82	2,71
	800	3,45	7,75	4,33	5,96	2,83
Fosfato de Araxá	200	1,80	4,72	2,91	3,03	2,20
	800	2,43	4,52	3,41	3,90	2,31
Phospal	200	2,43	6,25	3,24	3,77	2,24
	800	2,91	5,85	4,62	5,18	2,95

Tabela 6. Fontes de fósforo, extratores de P disponível e respectivas equações de regressão, coeficientes de correlação (r), e níveis críticos (NC) dos fosfatos naturais, em relação ao superfosfato triplo nas cinco classes de solos estudados.

Fontes de P	Extratores de P	Equação	r	NC ¹ (mg P dm ⁻³)
Superfosfato Triplo (ST)	Mehlich-1	Y= 92,3 – 126,0/P	- 0,95***	7,3
	Resina	Y= 92,6 – 138,0/P	- 0,95***	7,8
ST + Fosforita de Arad	Mehlich-1	Y= 87,4 – 114,4/P	- 0,87**	9,2
	Resina	Y= 88,1 – 126,6/P	- 0,88**	9,6
ST + Apatita de Araxá	Mehlich-1	Y= 80,1 – 97,0/P	- 0,64*	19,0
	Resina	Y= 82,0 – 117,3/P	- 0,69*	16,8
ST + Phospal	Mehlich-1	Y= 85,6 – 113,3/P	- 0,83**	11,0
	Resina	Y= 85,7 – 121,1/P	- 0,83**	11,3

*, ** e ***: valores significativos a 10%, 5% e 1% de probabilidade.
¹- Determinados pelo critério de 75% da produção relativa.

verificou com os fosfatos insolúveis, mostrando que esse método somente extrai P lábil, não provocando alterações nas propriedades químicas do solo e no fertilizante.

A inclusão da apatita de Araxá nas equações de regressão resultou em níveis críticos sensivelmente mais altos para os dois extratores, isto é, 19 mg dm⁻³ de P para o Mehlich-1 e 16,8 mg dm⁻³ de P para a resina, pelo critério de 75% da produção relativa de massa seca. Esses aumentos correspondem a 116% e 115% nos níveis críticos, quando comparados com a fonte solúvel (ST) analisada isoladamente. Isso é explicado pela maior acidez (pH < 1,3) do extrator Mehlich-1, que extrai, preferencialmente, as formas de P da apatita e do solo ligadas ao cálcio. Essas formas de P, porém, não são realmente disponíveis a curto prazo para as plantas (Rossi *et al.* 1999). Portanto, em solos fertilizados com fosfatos apatíticos, o extrator Mehlich-1 torna-se inadequado para avaliar P disponível no solo (Silva & Rajj 1996, Brasil & Muraoka 1997).

A correlação altamente significativa entre a produção relativa de massa seca e o P extraído, aplicado como fosfato de alumínio e cálcio (Phospal), foi igual para os dois extratores. A similaridade dos coeficientes de correlação indica que estes extratores são eficientes na extração do P disponível do solo, indicando que reagiram de forma semelhante. Explicase esse resultado pela maior solubilização do Phospal, cuja eficiência agrônômica média é de 58% (Tabela 4) e, segundo Braga *et al.* (1991), é considerada apenas moderada.

O nível crítico médio obtido pelos dois extratores (Tabela 6) foi de 11,1 mg dm⁻³ de P, valor este próximo ao encontrado para a fosforita, de 9,4 mg dm⁻³ de P; porém, mais alto que o nível crítico determinado para a fonte solúvel (ST) isolada, de 7,5 mg dm⁻³ de P. Depreende-se daí que as quantidades absolutas de P extraída dos solos, nos quais foram aplicados fosfatos de diferentes origem e natureza

química, não representam um critério seguro de classificação da reatividade das diversas fontes de P, tanto no solo quanto no extrator. Por essa razão, a real eficiência agrônômica dos fosfatos alternativos somente poderá ser consolidada por meio da resposta biológica.

Acumulação de fósforo na massa seca do milho

As equações de acumulação de fósforo em função dos teores de P disponíveis nos solos foram estimadas com os dados transformados em valores relativos. Isso, devido aos variados processos de formação, mineralogia, poder tampão, capacidade de adsorção de P e, principalmente, dos teores de argila (com variações de 120 g kg⁻¹ a 580 g kg⁻¹), que interferem de forma diferenciada na atuação dos extratores. Percebe-se que os dois extratores praticamente retiraram a mesma quantidade do P extraível do solo, pelo critério da acumulação relativa de 75% (Figura 1).

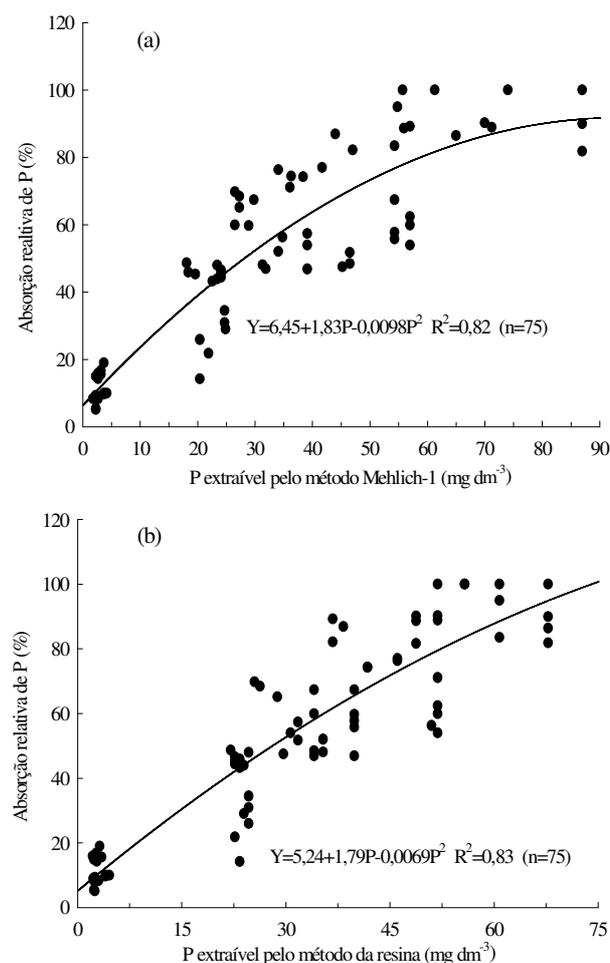


Figura 1. Acumulação relativa de fósforo pelo milho em função dos teores de P extraível – Mehlich-1 (a) e resina (b) – e aplicado como superfosfato triplo nos solos avaliados.

Eficiência de recuperação de fósforo pelo milho

Os níveis críticos, obtidos a partir das curvas de acumulação de P pelo milho, foram determinados pelo critério de 75% dos valores relativos, encontrando-se 51,3 mg dm⁻³ e 52,5 mg dm⁻³ de P disponível no solo para os extratores Mehlich-1 e resina, respectivamente (Figura 1). Esses valores são discrepantes aos níveis encontrados nas relações de massa seca do milho em função do P disponível (Tabela 6). Uma explicação plausível para isso pode ser buscada no ambiente restrito dos vasos, nos quais há limitação para o crescimento radicular da planta teste (Kliemann 1987), e nas doses elevadas de P e de outros nutrientes usados em trabalhos de casa de vegetação. Gonçalves *et al.* (1986) consideram que nesses ensaios são empregadas altas doses de P e de outros nutrientes, por causa da limitação do sistema radicular, o que leva a uma baixa eficiência de absorção dos mesmos nutrientes. De um modo genérico, constata-se a tendência em diminuir a eficiência de recuperação de P pela planta teste, mensurada pelo índice relativo de acumulação de P (IRAF), tanto na fonte solúvel (ST), quanto nas fontes com liberação gradual de P (Tabela 7).

É interessante notar que a eficiência de recuperação de P é mais alta na dose mais baixa de superfosfato, no solo RQo (Neossolo Quartzarênico). Isso foi da ordem de 20% na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, decrescendo drasticamente a 6,6% na dose de 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Comportamentos semelhantes foram constatados para os solos LVdf, LVAd, PVAe e LVd, nos quais a eficiência de recuperação foi de 34%, 32%, 34% e 26%, na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, decrescendo a 11%, 9%, 16% e 19% na dose de 800 kg ha⁻¹, respectivamente. Carvalho *et al.*

(1995) também constataram baixa eficiência de recuperação de P pelo feijoeiro, em especial nas doses mais elevadas (Tabela 7).

Diante do exposto, depreende-se que níveis críticos de nutrientes no solo, gerados a partir de dados de experimentos em casa de vegetação, são irrealistas; mas, servem para avaliar o comportamento de extratores e suas relações entre as quantidades absorvidas e os teores disponíveis nos solos. Os índices de eficiência agrônômica obtidos em condições controladas, ao contrário, oferecem resultados confiáveis, visto que são compatíveis com aqueles gerados em nível de campo (Korndörfer *et al.* 1998, Kliemann & Lima 2001). Pelas razões apresentadas, sugere-se que, em hipótese alguma, dados de experimentos de casa de vegetação devam ser usados para estabelecimento de níveis críticos – definitivos – nem tampouco para a recomendação quantitativa de quaisquer fertilizantes, principalmente dos fosfatados.

CONCLUSÕES

1. Os fosfatos estudados apresentam a seguinte ordem decrescente de eficiência agrônômica: fosfato de Arad > fosfato de Al e Ca > fosfato de Araxá.
2. O método de Mehlich-1 solubiliza os fosfatos naturais apatíticos, superestimando o fósforo disponível nos solos.
3. Os métodos da resina e Mehlich-1 são eficientes na extração do fósforo disponível nos solos.

REFERÊNCIAS

- Barnes, J. S. & E. J. Kamprath. 1975. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soil. North Carolina Agricultural Station. 23 p. (Technical Bulletin 229)
- Baligar, V. C., R. R. Duncan & N. K. Fageria. 1990. Soil-plant interaction on nutrient use efficiency in plants: an overview. p. 351-373. In V. C. Baligar & R. R. Duncan (Eds). Crops as enhancer of nutrient use. San Diego, Academic Press. 453 p.
- Braga, N. R., H. A. A. Mascarenhas, E. A. Bulisani, B. van Raij, C. T. Feitosa & R. Hiroce. 1991. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. Rev. Bras. Ci. Solo, 15 (3): 315-19.
- Brasil, E. C. & T. Muraoka. 1997. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. Rev. Bras. Ci. Solo, 21 (4): 599- 606.

Tabela 7. Fósforo absorvido e índice de eficiência na acumulação de P pelo milho, por tipo de solo, em relação às doses e fontes de fósforo aplicadas.

Fontes	Doses de P (mg kg ⁻¹)	LVAd		PVAe		LVd		LVdf		RQo	
		g vaso ⁻¹	IRAF ¹								
ST ²	0	1,6	–	3,4	–	2,5	–	3,7	–	2,7	–
	21,83	8,6	32,1	10,7	33,7	8,2	26,1	11,1	34,1	7,2	20,5
	43,66	11,5	22,7	23,1	45,2	19,4	38,7	12,2	19,5	8,3	12,9
	87,32	13,9	14,0	29,3	29,7	26,8	27,8	14,9	12,8	9,3	7,5
	174,64	17,4	9,0	31,7	16,2	35,8	19,1	22,4	10,7	14,3	6,6
Arad	43,66	5,6	9,1	22,7	44,3	11,9	21,6	13,8	23,1	7,7	11,5
	174,64	10,4	5,0	24,8	12,3	12,8	5,9	19,5	9,0	8,9	3,6
	43,66	2,9	2,8	10,6	16,6	6,2	8,5	7,1	7,8	4,9	5,1
Araxá	174,64	4,9	1,9	9,0	3,2	7,2	2,7	9,2	3,1	6,1	1,9
	43,66	5,2	8,0	16,9	31,0	8,5	13,7	10,7	16,1	5,9	7,4
Phospal	174,64	6,8	3,0	15,2	6,8	12,7	5,8	15,5	6,7	9,6	4,0

¹- LVAd: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distrófico; e RQo: Neossolo Quartzarênico distrófico; ²- ST: superfosfato triplo; e ³- IRAF: índice relativo de acumulação de P pela planta, expresso em porcentagem.

- Carvalho, A. M. de; N. K. Fageria, I. P. de Oliveira & T. Kinjo. 1995. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 19 (1): 61-67.
- Coutinho, E. L. M., W. Natale, J. J. Stuppiello & P. E. Carnier. 1991. Avaliação da eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura do milho. *Científica*, 19 (2): 93-104.
- Couto, W., G. Leite & C. Sanzonowicz. 1989. The effectiveness of three phosphorus sources for pasture fertilization in a cerrado soil. *Pesq. Agropec. Bras.*, 24 (4): 423-30.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). 1997. Manual de métodos de análises químicas de solos. Rio de Janeiro. 212 p.
- Goedert, W. J. 1985. Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. Nobel, São Paulo; Embrapa-CPAC, Brasília. 422 p.
- Goedert, W. J., D. M. G. Sousa & E. Lobato. 1985. Fósforo. p. 129-166. In W. J. Goedert. Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. Nobel, São Paulo; Embrapa-CPAC, Brasília. 422 p.
- Gonçalves, J. L. de, N. F. de Barros, J. C. L. Neves & R. F. de Novais,. 1986. Níveis críticos de fósforo no solo e na parte aérea de eucalipto na presença e ausência de calagem. *Rev. Árvore*, 10 (1): 91-104.
- Jandel Scientific. 1999. SigmaPlot: Scientific Graphing Software Transform & Curve Fitting. 1. v. Revision SPW 6.0. San Rafael.
- Khasawneh, F. E. & E. C. Doll. 1978. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30 (1): 159-206.
- Korndörfer, G. H., W. A. L. Cabezas & N. Horowitz. 1998. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. São Paulo, Universidade de São Paulo. 120 p.
- Kliemann, H. J. & D. V. Lima, 2001. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. *Pesq. Agropec. Trop.*, 31 (2): 111-119.
- Kliemann, H. J. 1987. Contribuição ao estudo da disponibilidade de enxofre em solos brasileiros. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, São Paulo. 231 p.
- Léon, L. A., W. E. Fenster, & L. L. Hammond. 1986. Agronomic Potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 (3): 798- 802.
- Malavolta, E., C. G. Vitti & S. A. de Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed., rev. e atual. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba. 319 p.
- Miranda, L. N. de, J. A. de Azevedo, J. C. C. de Miranda & A. C. Gomes, 2002. Calibração de métodos de análise de fósforo e resposta do feijão ao fósforo no sulco. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37 (11): 1621-1627.
- Nelson, W. L., A. L. Mehlich & E. Winters. 1953. The development, evaluation and use of soil test for phosphorus availability. p. 153-188. In W. H. Pierre & A. G. Norman. Soil fertilizer phosphorus. Academic Press, New York. 353 p. (Agronomy 14)
- Raij, B. van. & J. A. Quaggio. 1983. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Instituto Agrônômico, Campinas. 31 p. (Boletim Técnico 81).
- Raij, B. van, J. A. Quaggio & N. M. Silva. 1986. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. *Comm. Soil Sci. Pl. Anal.*, 17 (3): 547-566.
- Rossi, C., A. R. M. dos Anjos, M. S. de Camargo, O. L. S. Weber, S. Imhoff & E. Malavolta. 1999. Efeito residual de fertilizantes fosfatados para o arroz: Avaliação do fósforo na planta e no solo por diferentes extratores. *Sci. Agr.*, 56 (1): 39-46.
- Silva, F. C. da & B. van Raij. 1996. Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em amostras de solos cultivados com cana-de-açúcar. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 20 (1): 83-90.