

EFEITO DO CAPEAMENTO DE APATITA DE ARAXÁ COM ALUMÍNIO SOBRE A DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E O CRESCIMENTO DE PLANTA^{1/}

Ivan E.J. Fernandez R.^{2/}

Roberto F. de Novais^{3/}

Victor Hugo Alvarez V.^{3/}

Maurício P.F. Fontes^{3/}

Antonio C. Ribeiro^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Respostas positivas à fertilização fosfatada para a maioria das plantas em solos brasileiros, principalmente naqueles de cerrado, têm-se constituído em uma regra com raras exceções (4, 33).

A extensa área de cerrado disponível para a agricultura e sua alta demanda de fósforo tornaram da maior importância os estudos sobre diferentes fontes desse nutriente (4, 37). Dentre essas, os fosfatos naturais têm merecido grande ênfase, particularmente para o cultivo de plantas perenes, como o eucalipto (6).

Os solos de cerrado apresentam características favoráveis à instabilidade dos fosfatos apatíticos, provocando sua solubilização e conseqüente disponibilidade do fósforo e do cálcio para as plantas (8, 10, 13, 14, 20,

¹ Parte da tese de mestrado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal de Viçosa para obtenção do título de mestre em Solos e Nutrição de Plantas. Aceito para publicação em 26.02.1996.

² Univesidad de La Serena - Chile.

³ Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. 36571-000 Viçosa, MG. Bolsista do CNPq.

QUADRO 1 - Características químicas, físicas e mineralógicas das amostras superficiais (0-20 cm) do Latossolo Vermelho-Escuro (LE) de Paracatu, do Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) de Patrocínio e da Areia Quartzosa de Três Marias (AQ)

Característica	LE	LV	AQ
pH H ₂ O (1:2,5)	4,89	4,87	5,54
Ca total (mg/dm ³) ^{1/}	179	171	275
Mg total (mg/dm ³) ^{1/}	71	167	40
Al total (mg/dm ³) ^{1/}	1933	1875	1.404
P total (mg/dm ³) ^{1/}	379	243	44
P (mg/dm ³) ^{2/}	0,6	0,6	0,6
P (mg/dm ³) ^{3/}	3,0	1,4	1,4
P (mg/dm ³) ^{4/}	0,5	0,5	0,5
P remanescente (mg/L) ^{5/}	11,87	4,91	30,94
CMAF (mg P/cm ³ solo) ^{6/}	1,38	1,66	0,45
K (mg/dm ³) ^{2/}	45,0	132,0	28,5
Fe (mg/dm ³) ^{2/}	28,8	11,8	16,0
Cu (mg/dm ³) ^{2/}	0,0	1,0	0,0
Mn (mg/dm ³) ^{2/}	2,0	2,9	1,6
Zn (mg/dm ³) ^{2/}	0,0	0,0	7,3
Al (cmolc/dm ³) ^{7/}	0,46	0,29	0,07
Ca (cmolc/dm ³) ^{7/}	0,20	0,20	0,03
Mg (cmolc/dm ³) ^{7/}	0,03	0,02	0,00
H + Al (cmolc/dm ³) ^{8/}	5,90	6,20	1,50
SB (cmolc/dm ³)	0,35	0,56	0,10
CTC efet. (cmolc/dm ³)	0,81	0,85	0,17
CTC total (cmolc/dm ³)	6,25	6,76	1,60
V (%)	5,60	8,28	6,25
m (%)	56,79	34,12	41,18
C.O (dag/kg) ^{9/}	3,00	2,61	0,39
Fe ₂ O ₃ (dag/kg) ^{10/}	12,36	7,37	1,13
Areia grossa (%) ^{11/}	7	24	56
Areia fina (%) ^{11/}	3	7	24
Silte (%) ^{11/}	16	31	2
Argila (%) ^{11/}	74	38	18
Capacidade de campo (dag/kg) ^{12/}	24,0	23,5	11,0
Densidade aparente (g/cm ³) ^{13/}	0,96	0,98	1,34
Mineralogia ^{14/}	Ka, Gb, Go, Hm	Gb, Go	Ka, Gb, Go, An

1/ Extrator HNO₃/HClO₄ (8:3) (v/v) (29). 2/ Extrator Mehlich-1 (17). 3/ Extrator Bray-1 (9). 4/ Resina (40). 5/ Alvarez V. (2). 6/ Capacidade máxima de adsorção de fósforo (2). 7/ Extrator KCl 1 mol/L (17). 8/ Extrator Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7,0 (17). 9/ Método Walkley-Black (17). 10/ Citrato-ditionito de sódio (18). 11/ Método da pipeta (18). 12/ Método da coluna (19). 13/ Alvarez V. (1). 14/ Ka: Caulinita; Gb: Gibbsita; Go: Goethita; Hm: Hematita; An: Anatásio; Difratograma da fração argila - radiação Cu K α , filtro de níquel.

de solução de acetato de sódio 3 mol/L, tamponada a pH 4,5 com ácido acético 6 mol/L, contendo alumínio nos teores correspondentes a 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mg/L, na forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, centrifugando-se, em seguida, por 10 min., a 5.000 rpm. No sobrenadante, foi determinado o alumínio pelo método de aluminon (2).

A isoterma de Langmuir foi ajustada em sua forma linearizada:

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{ab} + \frac{c}{b}, \quad \text{eq. 1}$$

em que a e b são constantes relacionadas à energia de adsorção e à capacidade máxima de adsorção, respectivamente; C é a concentração de alumínio na solução de equilíbrio (em mg/L de Al); e x/m o alumínio adsorvido às partículas de apatita, em mg/g de Al na apatita (39), sendo o ajuste feito até a concentração de 80 mg/L de Al em solução. O mesmo procedimento foi empregado para preparar amostras de apatita de Araxá com 0, 33, 66 e 99 % da adsorção máxima de alumínio, em solução tamponada a pH 4,5, constituindo-se nos tratamentos de capeamento com alumínio.

O valor da adsorção máxima (b) de alumínio na apatita, a pH 4,5, utilizado nesses cálculos é de 1,0324 mg/g de Al, estimado a partir da equação:

$$C/x/m = 1,2786 + 0,9686^{***} C \quad (R^2 = 0,999) \quad \text{eq. 2}$$

O valor do coeficiente relacionado à energia de ligação (a) é de $0,7586 \text{ (mg/L)}^{-1}$.

Amostras de 2 dm^3 de solo constituíram as unidades experimentais. Assim, estabeleceram-se 40 unidades experimentais, acondicionadas em sacolas plásticas, para cada um dos três solos, sendo 20 com o pH natural e as outras 20 com o pH corrigido para 6,0. Adicionou-se água até elevar a umidade do solo a 80 % da capacidade de campo. Depois da correção da acidez, os solos foram novamente homogeneizados e secados ao ar.

Os tratamentos foram aplicados em dose única de apatita de Araxá correspondente a 250 mg/dm^3 de P no solo, com base no teor de fósforo total do fosfato. O tratamento (T0) correspondeu à apatita de Araxá sem tratamento. No tratamento (T0%), utilizou-se a apatita de Araxá agitada com o tampão a pH 4,5, sem alumínio. Os tratamentos T33%, T66% e T99% corresponderam ao capeamento da apatita com doses crescentes de alumínio em solução tamponada, em pH 4,5, correspondentes a 33, 66 e 99 % da adsorção máxima de alumínio, respectivamente. Considerou-se 99 % e não 100 % da adsorção máxima de alumínio, em virtude da forma

hiperbólica da isoterma de Langmuir, o que não permitiria a estimativa do valor da concentração de equilíbrio (C) para a condição de 100 % da capacidade máxima de adsorção de alumínio.

Para se estabelecerem as quantidades de alumínio em solução (C) para se obter 33, 66 e 99 % de adsorção máxima de alumínio - CMAA (b), utilizou-se a isoterma de Langmuir em sua forma linearizada (eq.1), substituindo no seu modelo matemático as quantidades de alumínio (mg/g) correspondentes aos percentuais da CMAA, considerando-se, ainda, a relação de 0,5 g de apatita em 25 mL de solução existente no procedimento.

Os tratamentos foram obtidos do esquema fatorial [3 x 2 (1 + 4)], correspondendo, respectivamente, a três solos, dois valores de pH e (1 + 4) tratamentos da apatita, sendo um correspondente ao fosfato em sua forma original e quatro aos níveis crescentes de alumínio. Os tratamentos foram dispostos no delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições.

Como planta-teste, utilizou-se o sorgo (*Sorghum bicolor* Moench) 'Br-300', sendo colocadas para germinar 20 sementes por unidade experimental. A emergência ocorreu quatro dias mais tarde, e após o primeiro desbaste, feito aos 11 dias da semeadura, foram deixadas 12 plantas por unidade experimental. Cinco dias mais tarde, efetuou-se o segundo desbaste, deixando-se 10 plantas por vaso, ocasião em que foi aplicada solução nutritiva completa menos fósforo e cálcio (Quadro 2). O nitrogênio foi aplicado de cinco em cinco dias, na dose de 30 mg/dm³ de N no solo. Procurou-se manter a umidade do solo na capacidade de campo com irrigações diárias. Aos 54 dias após a emergência, as plantas foram cortadas a um centímetro acima da superfície do solo.

As amostras de material vegetal foram secadas a 65-70°C em estufa de ventilação forçada até peso constante e, depois, moídas, passando todo o material por peneira de 60 mesh. O material vegetal foi submetido à digestão nítrico-perclórica (25). Nos extratos, determinaram-se cálcio, por espectrofotometria de absorção atômica, e fósforo e alumínio, por espectrofotometria de absorção molecular.

Os solos de cada unidade experimental, depois de coletadas as plantas, foram secados ao ar, fazendo-se a separação das raízes ao passar por peneira de 2 mm e, então, homogeneizados, sendo retiradas subamostras para análise química. Foram analisados pH em H₂O (1:2,5), cálcio e alumínio trocáveis e fósforo disponível por Mehlich-1, por Bray-1 e por Resina. Cálcio e alumínio trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol/L, sendo suas concentrações determinadas com base em metodologias já citadas.

QUADRO 2 - Doses e fontes de nutrientes utilizadas na adubação básica dos solos

Nutrientes	Doses mg/dm ³	Fontes
N	150	(NH ₄) ₂ SO ₄ ; NH ₄ NO ₃
K	150	KCl
S	69	(NH ₄) ₂ SO ₄
Fe	1,55	FeCl ₃ .6H ₂ O
Cu	1,39	CuSO ₄ .5H ₂ O
Mn	3,66	MnCl ₂ .4H ₂ O
Zn	3,99	ZnCl ₂ .7H ₂ O
Mo	0,20	NaMoO ₄ .2H ₂ O
B	0,82	H ₃ BO ₃

Foram realizadas análises de variância dos dados de solo e de planta. Efetuou-se análise de regressão, ajustando equações para os valores de pH, cálcio e alumínio trocáveis, fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Resina, teores e conteúdos de fósforo, cálcio e alumínio na parte aérea das plantas como variáveis dependentes dos percentuais de alumínio correspondentes aos diferentes tratamentos de capeamento da apatita de Araxá dentro de cada solo. Os componentes de cada modelo de regressão foram testados até 10 % de probabilidade, pelo teste F, com base no quadrado médio do erro experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pesquisas anteriores têm demonstrado, em condições de laboratório, que o capeamento de partículas de apatita de Araxá pelo alumínio em solução provoca um bloqueio que limita a solubilização deste fosfato (15, 27, 36). Esse resultado não foi aqui confirmado, quando a planta foi utilizada como indicadora do fenômeno. O crescimento e a absorção de fósforo e de cálcio pelo sorgo (Quadro 3) apresentaram, na realidade, tendência contrária, ou seja, aumento do alumínio, condicionando maior solubilização da apatita, embora com poucos casos significativos.

QUADRO 3 - Produção de matéria seca, teores e conteúdos de fósforo, cálcio e alumínio em plantas de sorgo, para os tratamentos de capeamento de apatita de Araxá com Al em três solos, na ausência e presença de calagem

Solo ^{1/}	Tratamento ^{2/}										\bar{X} ^{4/}		
	T0	T0%	T33%	T66%	T99%	\bar{X} ^{3/}	T0	T0%	T33%	T66%		T99%	\bar{X} ^{3/}
Sem Calagem						Com Calagem							
Matéria seca (g/vaso)													
LE	9,00	7,13	7,33	7,78	7,49	7,75	6,32	4,03	4,41	4,45	5,53	4,95	6,35
LV	10,08	8,65	8,02	8,77	8,34	8,77	4,00	3,41	3,91	3,45	3,50	3,65	6,21
AQ	10,81	9,79	9,88	10,11	9,77	9,77	10,06	8,80	9,13	8,99	9,38	9,27	9,52
Fósforo (dag/kg) ^{5/}													
LE	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,14	0,14	0,15	0,16	0,14	0,15	0,13
LV	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10
AQ	0,10	0,10	0,09	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,10	0,11	0,11

Continua...

QUADRO 3 - Produção de matéria seca, teores e conteúdos de fósforo, cálcio e alumínio em plantas de sorgo, para os tratamentos de capeamento de apatita de Araxá com Al em três solos, na ausência e presença de calagem

Solo ^{1/}	Tratamento ^{2/}										\bar{X} ^{4/}		
	T0	T0%	T33%	T66%	T99%	\bar{X} ^{3/}	T0	T0%	T33%	T66%		T99%	\bar{X} ^{3/}
Sem Calagem													
Com Calagem													
Cálcio (dag/kg) ^{5/}													
LE	0,36	0,39	0,35	0,36	0,35	0,36	0,23	0,18	0,18	0,19	0,23	0,20	0,28
LV	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,22	0,20	0,17	0,17	0,22	0,20	0,17
AQ	0,52	0,54	0,51	0,51	0,49	0,51	0,51	0,51	0,46	0,50	0,54	0,50	0,51
Alumínio (µg/g)													
LE	191,4	163,7	163,9	172,1	158,5	169,9	175,6	176,0	211,8	192,1	223,3	195,8	182,9
LV	183,4	137,2	190,9	151,1	131,7	158,9	167,9	169,4	157,9	137,8	172,6	161,1	160,0
AQ	163,9	200,3	161,1	150,3	134,5	162,0	170,0	144,9	160,9	155,7	169,4	160,2	161,1

Continua...

Continuação

QUADRO 3 - Produção de matéria seca, teores e conteúdos de fósforo, cálcio e alumínio em plantas de sorgo, para os tratamentos de capeamento de apatita de Araxá com Al em três solos, na ausência e presença de calagem

Solo ^{1/}	Tratamento ^{2/}										\bar{x} ^{3/}	\bar{x} ^{4/}	
	T0	T0%	T33%	T66%	T99%	T0	T0%	T33%	T66%	T99%			
Sem Calagem											Com Calagem		
Fósforo (mg/vaso)													
LE	9,0	7,8	8,1	8,6	9,0	8,5	8,9	5,6	6,6	7,1	7,7	7,2	7,9
LV	8,1	7,8	7,2	7,9	7,5	7,7	4,0	3,1	3,9	3,8	3,9	3,7	5,7
AQ	10,8	9,8	8,9	11,1	9,8	10,1	11,1	9,7	10,0	10,8	9,4	10,2	10,2
Cálcio (mg/vaso)													
LE	32,4	27,8	25,7	28,0	26,2	28,0	14,5	7,3	7,9	8,5	12,7	10,2	19,1
LV	15,1	11,2	10,4	12,3	10,8	12,0	8,8	6,8	6,7	6,6	7,7	7,3	9,7

1/ LE: Latossolo Vermelho-Escuro de Paracatu; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo de Patrocínio; AQ: Areia Quartzosa de Três Marias. 2/ Tratamentos: T0; T0%; T33%; T66%; T99% - o índice "0" indica apatita de Araxá sem capeamento com Al e sem agitação com o tampão. Os valores percentuais indicam graus de capeamento da apatita com Al em relação à capacidade máxima de adsorção de Al pela apatita. 3/ Média para tratamento dentro de calagem e dentro de solo. 4/ Média para solo. 5/ Mineralização HNO₃/HClO₄ (5:3) (25).

Observou-se que, em quase todas as condições de solo e calagem, o T0 proporcionou maior produção de matéria seca comparativamente ao T0% e ao T99% (Quadro 3), embora o último correspondesse ao tratamento com maior grau de capeamento do fosfato pelo alumínio. Entretanto, os contrastes significativos de produção de matéria seca entre T0 e T0% não são justificados pelos teores de fósforo na planta (Quadro 3). Semelhantemente, os teores de cálcio e de alumínio na planta também não justificariam a diferença entre esses dois tratamentos.

Houve também tendência, com poucos casos de significância estatística, para a diferença entre os tratamentos T0 e T0%, com T0 proporcionando maiores teores de fósforo no solo pelo Mehlich-1, Bray-1 e Resina (Quadro 4).

Determinações de PCZ em hidroxiapatitas evidenciaram que, sob força iônica de diferentes concentrações de eletrólitos, seu valor fica em torno de 8,5. Bell *et alii*, citados por MOTT (32), encontraram valores de 6,8 em trabalhos similares efetuados em fluorapatitas sintéticas. Assim, quando efetuado o tamponamento a pH 4,5 desenvolveu-se carga líquida positiva na superfície de apatita. Portanto, nesse valor de pH ocorrerá protonação dos oxigênios superficiais, levando-se em conta o fato de que o valor do PCZ da apatita encontra-se acima do pH do tampão. A presença de óxidos de ferro em minerais apatíticos como associação natural contribuiria para manter um PCZ igual ou ainda mais elevado que os valores citados. Uma tentativa para explicar a diferença de produção de matéria seca entre T0 e T0%, quanto ao comportamento do tampão acetato de sódio-ácido acético (Quadro 4), seria a hidrólise que apresenta o acetato, na qual as concentrações de ácido acético seriam iguais às de hidroxila no equilíbrio, favorecendo uma adsorção de acetato na superfície da apatita protonada.

Por meio de estudos sobre o caráter físico-químico de adsorventes, conclui-se que a magnitude da adsorção num sistema coloidal está estreitamente relacionada com os valores das constantes de dissociação dos ácidos e da formação de complexos (5). Nos tratamentos capeados com diferentes níveis de alumínio esse elemento desestabilizaria o equilíbrio entre apatita-acetato, dada a natureza de sua elevada densidade de carga. Na solução do solo, em pH abaixo de 5,5, a espécie de alumínio predominante seria $\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$, assim, parte dos fosfatos solubilizados estabeleceria uma ligação com o alumínio hidrolisado, promovendo menor disponibilidade de fósforo nessas condições. Mesmo que o capeamento da apatita pelo alumínio efetuado em laboratório tenha se apresentado efetivo, quando aplicado ao solo não mais o foi.

O comportamento da apatita frente à calagem mostrou que, em mé-

QUADRO 4 - Teores de fósforo pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Resina para os tratamentos de capeamento de apatita de Araxá com Al, em três solos, na ausência e presença de calagem

Solo ^{1/}	Tratamento ^{2/}										\bar{X} ^{3/}	\bar{X} ^{4/}	
	T0%	T33%	T66%	T99%	\bar{X} ^{3/}	T0	T0%	T33%	T66%	T99%			
	Sem Calagem												
	mg/dm ³												
	P-Mehlich-1												
LE	44,5	44,4	39,8	45,1	42,2	43,2	48,3	45,8	40,3	33,1	35,3	40,6	41,9
LV	25,6	21,3	21,0	23,3	24,6	23,2	38,3	35,8	35,1	28,9	33,8	34,4	28,8
AQ	73,8	66,7	72,4	73,9	62,3	69,8	89,1	68,2	70,6	77,6	79,0	76,9	73,4
	P-Blay-1												
LE	19,8	19,5	20,3	20,2	21,0	20,2	12,9	11,5	11,5	12,2	12,4	12,1	16,2
LV	6,9	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	4,1	3,9	3,5	3,5	3,6	3,7	5,2
AQ	25,0	24,0	23,5	24,8	24,5	24,4	17,8	17,4	17,4	18,6	19,3	18,1	21,3
	P-Resina												
LE	8,1	6,6	6,9	7,1	8,7	7,5	5,2	4,9	5,7	5,5	5,2	5,3	6,4
LV	3,4	3,7	4,6	4,1	4,6	4,1	2,3	2,3	2,5	2,5	2,8	2,5	3,3
AQ	5,1	4,4	5,6	5,1	5,1	5,1	4,6	4,6	4,6	5,6	5,6	5,0	5,1

1/ LE: Latossolo Vermelho-Escuro de Paracatu; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo de Patrocínio; AQ: Areia Quartzosa de Três Marias. 2/ Tratamentos: T0; T0%; T33%; T66%; e T99% - o índice "0" indica apatita de Araxá sem capeamento com Al e sem agitação com o tampão. Os valores percentuais indicam graus de capeamento da apatita com Al em relação à capacidade máxima de adsorção de Al pela apatita. 3/ Média para tratamentos dentro de calagem e dentro de solo/ 4/ Média para solo.

dia, o aumento de pH do solo proporcionou menor crescimento do sorgo (Quadro 3), particularmente naqueles solos que apresentaram, inicialmente, menores valores de pH, como o LE e o LV (Quadro 1).

A produção média de matéria seca para cada solo (Quadro 3), quando aplicada a calagem, segue relação inversa à capacidade máxima de adsorção de fosfato desses solos (Quadro 1). Estudos nesse sentido têm demonstrado que, em solos com maior capacidade máxima de adsorção de fosfatos, as taxas de recuperação do fósforo aplicado são sensivelmente menores (34).

Os componentes mineralógicos e os óxidos amorfos, associados às variações da capacidade de adsorção de fosfato em solos, têm sido estudados, encontrando-se correlações entre adsorção de fósforo e teores de gibbsita e goethita (4, 26).

Solos com baixa capacidade de adsorção de fosfato, como o AQ (Quadro 1), apresentam, em geral, maior eficiência agrônômica quando se utilizam fosfatos naturais comparativamente a solos com alta capacidade de adsorção de fosfatos com o mesmo pH (4, 23). Entretanto, a menor acidez inicial desse solo (Quadro 1) deveria ter sido condicionante de menor solubilização de apatita que nos outros dois, como extensamente demonstrado na literatura (12, 22, 28).

Pelo menos três aspectos básicos deveriam ser considerados para justificar esse comportamento do AQ. O primeiro é que, dada a grande aplicação de nitrogênio ao longo do cultivo (30 mg/dm³ de N no solo de cinco em cinco dias após o desbaste das plantas), o pH final do solo caiu bastante, apresentando, de modo geral, grandezas semelhantes nas condições de ausência como na presença de calagem (Quadro 5).

Um segundo aspecto a ser considerado sobre o AQ é seu menor teor de cálcio trocável, seguido pelo LE e LV na condição de calagem (Quadro 5), observando-se a mesma seqüência quanto à produtividade (Quadro 3). A literatura considera que os fosfatos naturais têm sua solubilidade também diminuída com o aumento de cálcio do solo, íon comum à apatita (24, 31). Assim, os resultados deste trabalho sugerem que, para a mesma grandeza de pH de solos, seus conteúdos de cálcio são críticos para a definição das condições de suprimento de fósforo do fosfato para as plantas. As menores diferenças entre os solos quanto a cálcio e à razoável semelhança entre os valores de pH, na condição de não-calagem, aparentemente justificam as menores diferenças de produtividade entre os solos nesta condição.

Um terceiro aspecto favorável ao AQ seria seu menor fator capacidade (Quadro 1), que, embora proporcionando menor solubilidade ao fosfato (menor "força de dreno"), permitiria ao fósforo solubilizado permane-

QUADRO 5 - Valores de pH e teores de cálcio e de alumínio trocáveis, para os tratamentos de capeamento de apatita de Araxá com Al, em três solos, na ausência e presença de calagem, após a colheita do experimento

Solo ^{1/}	Tratamento ^{2/}						\bar{X} ^{3/}	T0	T0%	T33%	T66%	T99%	\bar{X} ^{3/}	\bar{X} ^{4/}
	T0	T0%	T33%	T66%	T99%	T0								
	Sem Calagem						Com Calagem							
	pH (H ₂ O) ^{5/}													
LE	4,37	4,26	4,25	4,22	4,22	4,26	4,63	4,64	4,64	4,57	4,60	4,62	4,44	
LV	4,18	4,13	4,11	4,15	4,12	4,14	4,82	4,89	4,88	4,87	4,88	4,87	4,51	
AQ	4,38	4,68	4,64	4,68	4,67	4,61	4,97	4,95	4,96	4,99	4,99	4,97	4,79	
	Ca ²⁺ (cmol _c /dm ³) ^{6/}													
LE	0,209	0,167	0,158	0,185	0,147	0,173	0,646	0,693	0,625	0,697	0,833	0,699	0,436	
LV	0,349	0,260	0,353	0,307	0,264	0,307	1,426	1,134	1,240	1,223	1,202	1,245	0,776	
AQ	0,129	0,129	0,137	0,154	0,158	0,141	0,319	0,218	0,201	0,227	0,273	0,248	0,195	
	Al ³⁺ (cmol _c /dm ³) ^{6/}													
LE	0,219	0,240	0,240	0,223	0,180	0,220	0,069	0,068	0,061	0,070	0,070	0,068	0,144	
LV	0,146	0,158	0,154	0,150	0,158	0,153	0,031	0,035	0,028	0,031	0,031	0,031	0,092	
AQ	0,052	0,038	0,047	0,051	0,056	0,049	0,019	0,019	0,019	0,019	0,022	0,020	0,035	

1/ LE: Latossolo Vermelho-Escuro de Paracatu; LV: Latossolo Vermelho-Amarelo de Patrocínio; AQ: Areia Quartzosa de Três Marias. 2/ Tratamentos: T0; T0%; T33%; T66%; T99% - o índice "0" indica apatita de Araxá sem capeamento com Al e sem agitação com o tampão. Os valores percentuais indicam graus de capeamento da apatita com Al em relação à capacidade máxima de adsorção de Al pela apatita. 3/ Média para o tratamento dentro de calagem e dentro de solo. 4/ Média para solo; (5) Relação solo-solução 1:2,5 (18). 6/ Extrator: KCl 1 mol/L (17).

cer por mais tempo à disposição da planta, dada a menor transformação do P-lábil formado em P-não lábil. Nesse aspecto, a literatura tem sido consistente em afirmar que condições que favorecem a solubilização de fosfatos naturais não são, normalmente, aquelas que ajudam o aumento da disponibilidade e a absorção de fósforo pelas plantas (13, 14, 35, 38). A maior "força de dreno" para os produtos da solubilização dos fosfatos nos solos com maior fator capacidade é, também, a responsável pela maior cinética de formação de P-não lábil a partir do fósforo solubilizado (21).

A maior absorção de fósforo e de cálcio pelas plantas cultivadas no AQ (Quadro 3) também indica maior efetividade da apatita nesse solo. Entretanto, o maior conteúdo de cálcio na planta (Quadro 3), exatamente naquele solo com menor teor de cálcio ao final do experimento, deve ser questionado (Quadro 5). Aparentemente, melhor condição de crescimento da planta, proporcionada inicialmente pela maior disponibilidade e absorção de fósforo, tem gerado maiores demanda e condição de absorção de cálcio. Assim, o fósforo seria, ainda, o maior limitante da produtividade, havendo, certamente, perspectiva de maiores produtividades se mais fósforo fosse, de alguma forma, colocado à disposição da planta.

Um aspecto dos resultados que se mostrou intrigante são os elevados teores de fósforo nas plantas cultivadas no LE sem calagem (Quadro 3). O menor crescimento da planta nesse solo, comparado ao obtido no AQ, sugere maior limitação de outro nutriente que não o fósforo. Uma especulação a esse respeito seria uma grande limitação de zinco nesse solo, não corrigida totalmente pela adubação básica aplicada. Assim, nessa condição de deficiência de zinco, o fósforo acumular-se-ia na parte aérea sem uma adequada redistribuição na planta, como sugerido pela literatura (11, 30). Outra possível explicação seria a presença de maiores teores de alumínio na planta, inativando parte do fósforo encontrado no tecido, como também sugerido pela literatura (3).

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Trabalhos conduzidos em condições de laboratório têm mostrado significativa adsorção de alumínio por partículas de fosfato de Araxá, de modo a formar um provável capeamento dessas partículas. Esse efeito, com possível alteração da solubilização desse fosfato, não foi, ainda, testado quanto à resposta de planta, objetivo deste trabalho. Amostras de três solos de área de cerrado, com e sem calagem, receberam dose única de apatita de Araxá equivalente a 250 mg/dm^3 de P, com base no teor de fósforo total. A apatita foi aplicada como fosfato natural não-tratado (T0) (Testemunha) e com os seguintes tratamentos: fosfato agitado com uma

solução-tampão de acetato de sódio-ácido acético em pH 4,5 (T0%) e fosfato capeado com doses crescentes de alumínio, na forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, em solução tamponada em pH 4,5, correspondentes a 33, 66 e 99 % da adsorção máxima de alumínio pela apatita (T33%, T66% e T99%). Os tratamentos foram dispostos, em casa de vegetação, no delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. Como planta-teste utilizou-se o sorgo (*Sorghum bicolor* Moench) 'Br-300'.

Pelos resultados conclui-se que:

1. A diferença entre solos quanto à capacidade máxima de adsorção de fosfato promoveu uma solubilização diferencial do fosfato, sem, contudo, um correspondente aumento da disponibilidade de fósforo para as plantas.
2. O aumento do pH do solo promoveu crescimento menor das plantas, evidenciando-se que, com a aplicação de calagem, o cálcio, como íon comum à apatita, favoreceu o deslocamento do equilíbrio para a manutenção do fosfato como composto menos solúvel.
3. O capeamento das partículas da apatita de Araxá com o alumínio não limitou a liberação de fósforo e de cálcio, não alterando, portanto, o crescimento das plantas.

5. SUMMARY

(EFFECT OF COATING ARAXÁ PHOSPHATE ROCK WITH ALUMINUM ON PHOSPHORUS AVAILABILITY AND PLANT GROWTH)

Significant adsorption of aluminum, as a coating, on particles of Araxá phosphate rock (APR) has been shown under laboratory conditions. The main objective as this work is to test the probable alteration on the solubilization of this phosphate. Three soil samples from the cerrado region, with lime and without lime, received 250 mg of total P per dm^3 of APR. APR samples were submitted to different treatments: non-treated commercial form (T0); shaken with a sodium acetate-acetic acid solution buffered at pH 4.5 (T0%), and APR coated with increasing doses of $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in solution, equally buffered at pH 4.5, corresponding to 33, 66 and 99 % of the APR aluminum maximum adsorption (T33%, T66% and T99%, respectively). The experiment was arranged in a randomized block design with four replications. Sorghum (*Sorghum bicolor* Moench, 'Br-300') was used as test plant. The T0 treatment showed the highest

plant dry matter yield in all soils. In general, for the without lime treatments-plant growth was higher when compared with the treatments with lime. The T0% treatment caused smaller plant growth than treatments T33%, T66% and T99%. Dry matter yield, phosphorus and calcium uptake by the plants indicated that the coating of the APR particles by aluminum does not limit the supply of these nutrients to the plants.

6. LITERATURA CITADA

1. ALVAREZ V., V.H. *Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evaluación del fósforo disponible de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Meseta Tarasca, Edo. Michoacán*. Chapingo, Colegio de Postgraduados, 1982. 300p. (Tesis de Doctor en Ciencias)
2. ALVAREZ V., V.H. *Caracterização química de solos*. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1985. 77p.
3. ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Efeito do alumínio sobre a absorção e translocação de fósforo e sobre a composição mineral de dois cultivares de trigo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 23:563-573, 1988.
4. BAHIA FILHO, A.F. *Índice de disponibilidade de fósforo em latossolos com diferentes características texturais e mineralógicas*. Viçosa, UFV, 1982. 178p. (Tese D.S.)
5. BAILEY, G.W. & WHITE, J.L. *Factors influencing the adsorption, desorption, and movement of pesticides in soil*. Residue Reviews, New York, vol.32. 1970. 92p.
6. BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. (ed.). *Relação solo-eucalipto*. Viçosa, Editora Folha de Viçosa, 1990, p.127-186.
7. BLANCO, H.G; VENTURINE, W.R. & GARGANTINI, H. Comportamento de fertilizantes em diferentes condições de acidez do solo, para trigo, com estudo do efeito residual para soja. *Bragantia*, 24:261-279, 1965.
8. BRAGANÇA, J.B. *Solubilização do fosfato de Araxá em diferentes tempos de incubação em um solo com diversos níveis de alumínio trocável*. Viçosa, UFV, 1979. 69p. (Tese M.S.)
9. BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil. Sci.*, 59:39-45, 1945.
10. CABALA R., P. & SANTANA, M.B.M. Influência do tempo de contato com o solo e valor fertilizante de fontes fosfatadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 19. Curitiba, 1983. *Resumos*, Curitiba, Soc. Bras. Ci. Solo, Campinas, 1983. p.45.
11. CAKMAK, I. & MARCHNER, H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. III. Changes in physiological availability of zinc in plants. *Physiol. Plantarum*, 70:13-20, 1987.
12. CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & THIÉBAUT, J.T.L. Época de aplicação de fosfato natural em relação à calagem, num solo com elevado teor de alumínio trocável. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:129-131, 1981.
13. CHIEN, S.H. Dissolution rates of phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:656-657, 1977.
14. CHIEN, S.H. Dissolution of phosphate rocks in a flood acid soil. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 41:1106-1109, 1977.

15. COUTO, C. & NOVAIS, R.F. Efeito do alumínio em soluções tamponadas a diferentes valores de pH sobre a solubilização de apatita de Araxá. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:7-10, 1986.
16. COUTO, C.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Efeito de características químicas, físicas e mineralógicas do solo sobre a solubilização de apatita de Araxá. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:239-244, 1987.
17. DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. *Análise química de solo (Metodologia)*. Viçosa, Impr. Univ., 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29)
18. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos - EMBRAPA-SNLCS. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
19. FERNANDES, B. & SYKES, J.O. Capacidade de campo e retenção de água em três solos de Minas Gerais. *Rev. Ceres*, 15:1-39, 1968.
20. FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & RIBEIRO, A.C. Níveis críticos de fósforo para o crescimento do estilozantes como função do fator capacidade de fósforo do solo. *Rev. Ceres*, 32:488-499, 1985.
21. GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:13-24, 1989.
22. GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Eficiência agrônômica dos fosfatos em solos de cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.*, 15:311-318, 1984.
23. HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H. & EASTERWOOD, G.W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1601-1608, 1986.
24. HAYNES, R.J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil*, 68:289-308, 1982.
25. JOHNSON, C.M. & ULRICH, A. Analytical methods for use in plant analysis. *California Agric. Exp. Station Bull.*, 766:32-33, 1959.
26. JONES, R.C.; HUDNALL, W.H. & SAKAY, W.S. Some highly weathered soils of Puerto Rico. 2. *Mineralogy. Geoderma*, 27:75-137, 1982.
27. JUNQUEIRA, R.M.R. & RIBEIRO, A.C. Efeito da adição de cloreto de alumínio a soluções tamponadas de acetato de sódio sobre a solubilização de apatita de Araxá. *Rev. Ceres*, 30:39-44, 1983.
28. KHASAWNEH, F.E. & DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30:159-206, 1978.
29. LANARV/SNAD. *Análise de corretivos fertilizantes e inoculantes. Métodos oficiais*. Brasília, Laboratório Nacional de Referência Vegetal, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, Ministério da Agricultura, 1983. 103p.
30. MARSCHNER, H. & ÇAKMAK, J. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. II. Evidence for impaired shoot control of phosphorus uptake and translocation under zinc deficiency. *Physiol. Plantarum*, 68:491-496, 1986.
31. MICHAEL, A.W. & ELLIS, B.G. Influence of calcium solution activity and surface area on the solubility of selected rock phosphates. *Soil Sci.*, 138:345-359, 1984.
32. MOTT, C.J.B. Anion and ligand exchange. In: Greenland D.J. & Hayes M.H.B. (ed.). *The chemistry of soil processes*. New York, John Wiley & Sons, 1981. p.179-220.
33. MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. *Rev. Ceres*, 34:127-150, 1987.
34. NOVAIS, R.F. *Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soil*. Raleigh, N.C. State University, 1977. 153p. (Tese Ph.D.)