

Uso de enxofre elementar na solubilização de adubos fosfatados na cultura do milho

Maria do Carmo Lana¹, Leandro Rampim^{2*}, Jucenei Fernando Frandoloso³, Silvano Fontaniva⁴, Rodrigo Viane Czcza⁵

¹Engenheira Agrônoma, Doutora, Professora Adjunto C do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Campus de Marechal Cândido Rondon. Rua Pernambuco, 1777, Centro, CEP 85960-000, Marechal Cândido Rondon, PR; mclana@unioeste.br

²Engenheiro Agrônomo, Doutor, Professor Adjunto, Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO, Setor de Ciências Agrárias e Ambientais - Departamento de Agronomia, campus Cedeteg, Rua Simeão Varela de Sá, 03 - Vila Carli, CEP: 85040-080, Guarapuava, PR; rampimleandro@yahoo.com.br

³Engenheiro Agrônomo, Doutor, Técnico do Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas da Unioeste, Campus de Marechal Cândido Rondon; juceneiff@bol.com.br

⁴Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Campus de Marechal Cândido Rondon; silvano_fontaniva@yahoo.com.br

⁵Engenheiro Agrônomo, Mestre, Universidade de São Paulo – Esalq/USP, Piracicaba, SP; rodrigo_czcza@yahoo.com.br

* Autor correspondente.

Resumo: Há necessidade em incrementar produtividade das culturas tanto em solos com baixo teor de fósforo (P) quanto em solos com teor adequado. Há ainda que se repor ao solo a elevada demanda pela adubação fosfatada, exigido pela utilização de variadas fontes de P, como fosfato natural de rocha. Essa busca poderá elevar a disponibilidade e aumento da eficiência de utilização pelas plantas. O objetivo foi avaliar o uso de enxofre elementar na solubilização do fósforo contido no fosfato natural reativo em comparação ao superfosfato triplo e monitorar a absorção de nutrientes pelas plantas de milho. O experimento foi conduzido em delineamento experimental em blocos inteiramente casualizados com 4 repetições, com tratamentos arranjados em esquema fatorial 2x5x2, sendo duas fontes de fósforo (superfosfato triplo-SFT e fosfato natural reativo-FNR), cinco doses de fósforo e duas doses de enxofre elementar (0 e 50 mg dm⁻³) em Latossolo Vermelho Eutroférico. Foi realizado

avaliação de biomassa seca de parte aérea, teor de P, S, eficiência de utilização de fósforo-EUP para cada dose de P_2O_5 , índice de eficiência agrônômica-IEA do FNR. A produção de biomassa seca da parte aérea foi maior na fonte SFT, e a adição de enxofre elementar (S^0) não influenciou desenvolvimento das plantas nem o índice de eficiência agrônômica (IEA) do FNR. O conteúdo de fósforo (P) foliar na presença do S^0 indicou menor de necessidade de P_2O_5 para atingir ponto de máximo acúmulo de biomassa. Apesar da oxidação do S^0 reduzir o pH do solo e elevar o teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo não influenciou a solubilização do FNR.

Palavras chaves: fontes de fósforo, sulfato, enxofre elementar, índice de eficiência agrônômica.

Use of elementary sulphur in the solubilização of phosphates fertilizers in the culture of corn

Abstract: Needed to increase crop yields as soils with low phosphorus (P) content as soils with adequate content to replace increases demand for phosphate fertilizer, requiring use of varied sources of P, as natural phosphate rock with continues search to elevate availability and increase plant uptake efficiency. The objective was to evaluate the use elementary sulphur in the dissolution of the phosphorus contained in the reactive natural phosphate in comparison to triple superphosphate and monitor absorption of nutrients for the corn plants. The experiment was developed in in blocks complete randomizes design with four replications with the treatments arranged in a $2 \times 5 \times 2$ factorial design with two sources of phosphorus (triple superphosphate – TSP and reactive natural phosphate – RNP) five rates of phosphorus (0, 100, 200, 300, 400 $mg\ dm^{-3}$ of P_2O_5) and two rates of elementary sulphur (0 and 50 $mg\ dm^{-3}$) in eutroferic Red Latosol (Oxisol). Was performed dry biomass assessment shoot, P and S leaf tissue, phosphorus utilization efficiency (PUE) for each dose of P_2O_5 and agronomic efficiency (IEA) of FNR. Production of dry biomass of aerial part was bigger in source TSP, and addition of elementary sulphur (S^0) did not influence crop development and index of efficiency of agronomic of the RNP. Phosphorus content in the leaf presence of the S^0 indicated minor necessity of P_2O_5 for plant to reach maximum point dry biomass.

Despite the oxidation of the S^0 reduce pH of the soil and increase the $S-SO_4^{2-}$ concentration it did not influence the dissolution of the RNP.

Keywords: phosphorus sources, sulphate, elementary surfur, agronomic efficiency index.

Introdução

O fósforo apresenta alta interação com os colóides do solo e em conseqüência disso há baixa eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados, levando à aplicação de grandes quantidades destes adubos em cada ano de cultivo para suprir as necessidades das culturas (Raij, 1991; Novais e Smyth, 1999). Arelado ao alto custo dos fertilizantes, e por se tratar de um recurso natural não renovável, finito e sem sucedâneo, justificam estudos para melhorar a eficiência no uso destes adubos (Goedert e Souza, 1986; Horowitz e Meurer, 2004).

Diversos adubos fosfatados são encontrados no comércio, distinguindo-se quando a concentração e a solubilidade de fósforo (Kaminski e Peruzzo, 1997). Entre estas fontes os fosfatos naturais reativos (FNRs) originários de rochas sedimentares apresentam menor eficiência agrônômica inicial em função da baixa solubilidade, e por isso tem sido utilizados mais como fosfatagem corretiva para elevar teores de P no solo (Novais e Smyth, 1999). Entretanto, Resende et al. (2006) relatam em seu trabalho o uso eficiente do fosfato natural em milho cultivado em Argissolo Vermelho Distrófico típico para suprir as necessidades de culturas de ciclo curto, principalmente nas culturas seguintes devido ao efeito residual.

A liberação lenta de fósforo para a solução do solo dos FNRs constitui em limitação para seu uso “*in natura*” devendo ser empregado em condições adequadas para otimizar seu efeito no suprimento de fósforo as culturas (Lenz et al., 2000). Segundo Horowitz e Meurer (2003a), a solubilização destes fosfatos é favorecida quando utilizados em solos ácidos, com pH em água inferior a 6,0. Outra alternativa para estimular a solubilização é a adição de enxofre elementar (S^0), o qual ao ser oxidado no solo por microrganismos do gênero *Thiobacillus* promove a dissociação da rocha fosfática e liberação de fósforo para solução do solo (Stamford et al., 2004), além de fornecer sulfato às plantas.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de enxofre elementar na solubilização do fósforo contido no fosfato natural reativo em comparação ao superfosfato triplo e monitorar a absorção de nutrientes pelas plantas de milho.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no cultivo protegido do Núcleo de Estações Experimentais da Unioeste, *Campus* de Marechal Cândido Rondon, em vasos de polietileno com capacidade para 7 dm³. Foram utilizadas amostras deformadas de um Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) (Embrapa, 2006), de textura argilosa (706,5 g kg⁻¹ de argila) proveniente do município de Marechal Cândido Rondon/PR, coletado na profundidade de 0 a 0,20 m. O solo foi corrigido com CaCO₃ e MgCO₃ P.A., mantendo relação Ca/Mg de 4:1, suficiente para elevar saturação por bases a 70%. Após 30 dias de incubação o solo foi seco a temperatura ambiente tamizado em peneira de malha 4 mm e uma amostra representativa foi encaminhada para análise química, cujos resultados encontram-se na Tabela 1.

Posteriormente efetuou-se a adubação de N, K e micronutrientes iguais para todos os tratamentos, sendo: 150 mg dm⁻³ de K₂O na forma de KCl; 25 mg dm⁻³ de N semanalmente via solução na forma de uréia a partir do 4^o dia após a emergência (DAE) das plantas de milho. Os micronutrientes foram aplicados via solução no momento da semeadura e no 22^o DAE, nas concentrações e fontes conforme descritas por Novais et al. (1991).

Tabela 1. Características químicas do LVef na camada de 0 – 20 cm de profundidade utilizado no experimento

M.O. ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	S ⁽³⁾	pH	H + Al ⁽⁴⁾	K ⁺ ⁽²⁾	Ca ²⁺ ⁽⁵⁾	Mg ²⁺ ⁽⁵⁾	Al ³⁺ ⁽⁴⁾	SB	CTC	V
g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³							%
22,56	14,09	11,61	5,88	3,42	0,33	4,47	1,15	0,00	5,95	9,37	63,50

⁽¹⁾ Método Walkey-Black; ⁽²⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽³⁾ Extrator Ca(H₂PO₄)₂ 500 mg L⁻¹ em HOAc 2 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ pH determinado em SMP (7,5); ⁽⁵⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizados com quatro repetições, com os tratamentos arranjos em esquema fatorial 2x5x2 sendo duas fontes de fósforo (superfosfato triplo – SFT e fosfato natural reativo – FNR), cinco doses de

fósforo (0, 100, 200, 300, 400 mg dm⁻³ de P₂O₅) e duas doses de enxofre elementar (0 e 50 mg dm⁻³).

As fontes de P utilizadas apresentam as seguintes especificações: 1) Superfosfato triplo: 45% de P₂O₅ solúvel em citrato neutro de amônio + água (CNA + H₂O) e 41 % de P₂O₅ solúvel em H₂O; 2) Fostato natural reativo de Gafsa: 28% de P₂O₅ total; 9% de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 2%; Para efeito de cálculo para as doses considerou-se a concentração de P₂O₅ solúvel em CNA + H₂O do SFT e a concentração de P₂O₅ total do FNR. Para o S-elementar considerou-se pureza de 100% de S. As fontes de K, P e S foram misturadas em todo volume de solo de cada vaso.

Em cada vaso foi cultivado três plantas de milho (híbrido Pioneer 30F98). Na condução do experimento, foi irrigado diariamente, mantendo umidade na capacidade de campo do solo.

Aos 30 dias após a emergência as plantas foram colhidas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C. Após atingir peso constante, o material vegetal foi pesado para determinar a biomassa seca da parte aérea, e foi determinado teor de fósforo conforme metodologia descrita por Braga e Defelipo (1974), e enxofre conforme metodologia descrita por Alvarez V. et al. (2001).

As amostras de solo de cada vaso foram coletadas e secadas em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C. Posteriormente foram mensurados os teores de fósforo conforme metodologia descrita por Defelipo e Bibeiro (1981), enxofre conforme metodologia descrita por Alvarez V. et al. (2001) e pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹.

A eficiência de utilização de fósforo (EUP) para cada dose de P₂O₅, foi obtida pela equação $EUP = [(BMS) / (Cont. P)]$, onde BMS é a biomassa seca da parte aérea do milho (mg/vaso) de cada tratamento e Cont. P é o conteúdo de fósforo acumulado na parte aérea (mg/vaso) obtido pelo produto entre teor de P foliar e biomassa produzida de cada tratamento. O índice de eficiência agrônômica (IEA) do FNR foi estimado por $IEA = [(BMS \text{ tratamento fosfato natural reativo}) / (BMS \text{ tratamento superfosfato triplo})] \times 100$, em que BMS é a biomassa seca da parte aérea do milho.

Os dados foram submetidos à análise de variância e análise de regressão para comparação do efeito de doses e fontes dos fertilizantes fosfatados com e sem adição de S⁰. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, pelo teste F, considerando os níveis de 5 e 1

% de probabilidade de erro e no maior valor do coeficiente de determinação ajustado (R^2).

Resultados e Discussão

A adição de enxofre elementar (S^0) não interferiu na maioria das variáveis avaliadas, exceto para conteúdo de S foliar, pH e teor de S no solo (Tabela 2). O teor inicial médio de $S-SO_4^{2-}$ do solo (Tabela 1) possivelmente foi suficiente para suprir a necessidade do milho nos estádios iniciais, visto que a adição de S^0 , mesmo com oxidação repercutindo em aumento de $S-SO_4^{2-}$ na solução do solo (Tabela 2), não implicou em produção de biomassa.

Tabela 2. Resumo da análise de variância e comparação de médias para altura de planta, biomassa seca da parte aérea, teores de P e S foliar, conteúdo de P e S da parte aérea, e pH, P e S no solo, em função da aplicação de FNR e SFT, sem e com adição de enxofre elementar

Fontes de Variações	Biomassa seca	P foliar	S foliar	Conteúdo P	Conteúdo S	pH solo	P solo	S solo
	g/vaso	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg/vaso	mg/vaso		mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
FNR	5,76b	2,64a	4,05a	15,32b	23,42b	5,57b	64,37a	20,65a
SFT	28,93a	1,92b	2,76b	53,63a	70,50a	5,64a	35,60b	16,78b
Sem adição de S	17,12a	2,31a	3,35a	34,53a	45,23b	5,62a	51,14a	14,56b
Com adição de S	17,57a	2,25a	3,46a	34,42a	48,69a	5,58b	48,82a	22,87a
Valor de F								
Fonte	4756,78**	137,38**	242,91**	1509,78**	1154,58**	65,39**	134,12**	28,13**
Dose	389,69**	4,24**	14,57**	183,15**	105,41**	12,54**	129,91**	12,68**
Enxofre	1,80 ^{ns}	1,25 ^{ns}	1,64 ^{ns}	0,01 ^{ns}	6,26*	13,18**	0,87 ^{ns}	129,81**
Fonte x Dose	361,96**	9,34**	25,25**	136,51**	82,23**	6,33**	17,26**	7,36**
Dose x Enxofre	0,41 ^{ns}	1,04 ^{ns}	0,74 ^{ns}	2,85*	0,61 ^{ns}	1,35 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,69 ^{ns}
Fonte x Enxofre	0,19 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,13 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,74 ^{ns}
Fonte x dose x enxofre	0,89 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,84 ^{ns}	1,99 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,93 ^{ns}
C.V. (%)	8,66	12,03	10,93	12,79	13,19	0,76	22,23	17,43

Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%; ns, * e **: Não significativo ($P > 0,05$), significativo a 5% ($P < 0,05$) e 1% ($P < 0,01$), respectivamente.

Entretanto, a oxidação de S^0 pode ser maior em períodos mais prolongados, influenciando outras variáveis que indicam efeito positivo na solubilização do FNR. Desta maneira, o período de 30 dias de condução do experimento pode ter sido insuficiente para melhor avaliar a oxidação do S^0 . Horowitz e Meurer (2006) observaram aumento nos teores de sulfato a partir do 22^o dia após a incubação e máximo aos 70 dias, ao aplicar enxofre elementar incubado em LVd típico.

A biomassa seca da parte aérea foi influenciada pela interação das fontes e doses de fósforo testadas. A fonte superfosfato triplo (SFT) produziu 402,3 % mais biomassa seca da parte aérea em relação ao fosfato natural reativo (FNR) (Tabela 2). Na interação fontes versus doses, a resposta foi quadrática na fonte SFT na dose de 278,8 mg dm⁻³ de P₂O₅ produzindo valor máximo de 36,7 g/vaso de biomassa seca. Para o FNR não houve interferência das doses de P, obtendo média de 5,8 g/vaso de biomassa seca (Figura 1).

Este resultado indica menor solubilização e disponibilidade de fósforo do FNR em relação ao SFT, mesmo com o aumento das doses, resultando em menor desenvolvimento das plantas, podendo mostrar sintomas de deficiência de fósforo. No entanto, os fosfatos naturais com baixa solubilidade em ácido cítrico e insolúvel em água, apresentam liberação lenta de P, tendo sido verificado melhores resultados em estudos longa duração (Novais e Smith, 1999), não sendo capaz de suprir a demanda deste nutriente em estádios iniciais. Desta forma, em situações de necessidade de disponibilidade de P em estádios iniciais, principalmente em solos com teores baixo e médio de P, é adequado utilizar fontes com maior solubilidade imediata.

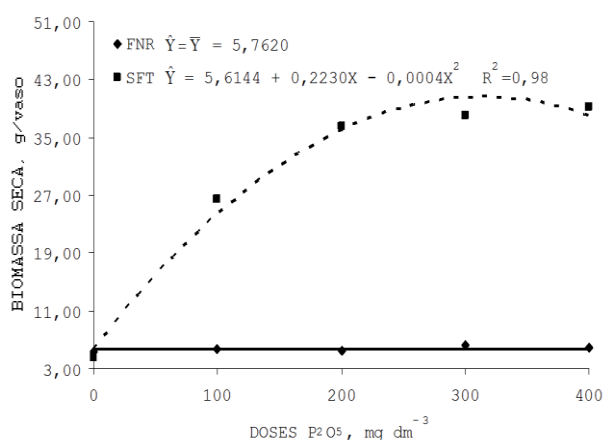


Figura 1. Biomassa seca da parte aérea em resposta a doses de P₂O₅ de fosfato natural reativo e superfosfato triplo.

Por outro lado, o alto teor de argila do solo e a incorporação da adubação fosfatada em todo volume de solo do vaso, permite maior contato do fertilizante com o solo, favorecendo adsorção de fosfato para ambas as fontes, que somada à liberação lenta do FNR reduz ainda mais o teor de P na solução do solo oriundo desta fonte. Segundo Resende et al. (2006), a solubilidade distinta dos adubos fosfatados se deve à

dinâmica que se estabelece nas interações do fósforo com o solo que condiciona variações no suprimento de P à cultura e reações de indisponibilidade do nutriente.

Os teores de P e S foliar foram maiores com a utilização do FNR, entretanto, a fonte SFT promoveu maior produção biomassa seca em relação à fonte FNR, caracterizando efeito de diluição destes nutrientes com a menor concentração no tecido vegetal (Tabela 2).

O teor de P foliar proporcionado pelo FNR foi 38% superior ao da fonte SFT (Tabela 2). A interação fonte versus dose demonstrou que a capacidade da cultura em acumular P no tecido foliar para a fonte SFT com dose de 209,6 mg dm⁻³ de P₂O₅ acarretando teor mínimo de 1,7 g kg⁻¹, e para o FNR a resposta foi linear crescente com incremento de 0,0014 mg kg⁻¹ de P por mg dm⁻³ de P₂O₅ aplicado (Figura 2).

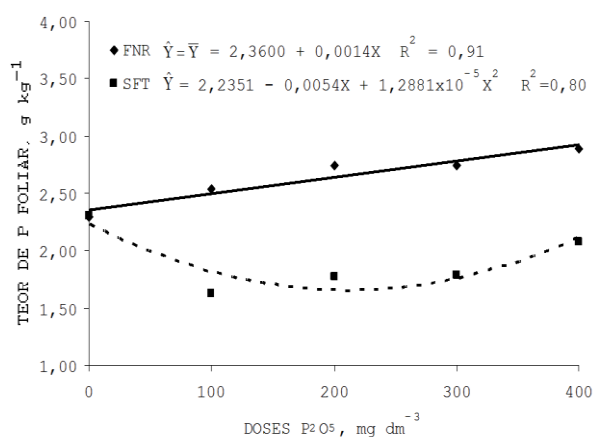


Figura 2. Teor de fósforo foliar em resposta a doses de P₂O₅ de fosfato natural reativo e superfosfato triplo.

A reatividade química dos FNR é determinada pela solubilidade do fosfato em ácido cítrico a 2% (Brasil, 1982). Esta fração de P extraída em ácido cítrico do FNR de gafsa (9%) é a primeira fração solubilizada em pequenas quantidades. Em função disso, a aplicação de doses crescentes de FNR proporcionou pequeno aumento do teor de P solúvel no solo e consequentemente promoveu efeito linear crescente do teor de P foliar (Figura 2), sem influenciar a produção de biomassa (Figura 1). Visto que, plantas com deficiência de P apresentam aumento na taxa de absorção pelas raízes, que quando colocadas em contato com este nutriente apresentam maior concentração de P no tecido foliar, comparada àquelas não submetidas à deficiência de fósforo (GRANT et al., 2001).

O conteúdo de fósforo foi influenciado pelas fontes de P, sendo observado valor 250% superior ao usar SFT triplo em relação ao FNR (Tabela 2). Também houve interação fontes versus doses, apresentando resposta do SFT com dose de $412,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de P_2O_5 com máximo conteúdo de $80,1 \text{ mg/vaso}$, no entanto, o FNR respondeu linearmente às doses, com incremento de $0,0127 \text{ mg/vaso}$ para cada mg dm^{-3} de P_2O_5 aplicado (Figura 3a). Este comportamento foi semelhante à produção de biomassa seca da parte aérea na fonte SFT (Figura 1) e do aumento linear do teor de P foliar na fonte FNR, em função das doses de P_2O_5 . Souza e Volkweiss (1987) obtiveram conteúdos de P na parte aérea crescente na cultura do milho, com o aumento das doses de P utilizando SFT, mesmo com diferentes diâmetros de grânulos, evidenciando maior solubilidade deste produto.

Para o conteúdo de P foi verificado incremento máximo com as doses de $416,7$ e $313,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de P_2O_5 sem adição e com adição de S^0 , respectivamente, com acúmulo de P na parte aérea igual a $46,9$ e $41,4 \text{ mg/vaso}$ sem adição e com adição de S^0 , respectivamente (Figura 3b). O conteúdo máximo de P foi obtido com menor dose de P_2O_5 na presença de enxofre elementar, comparado à produção máxima de biomassa seca da parte aérea (Figura 1). Estes resultados permitem inferir que as plantas necessitam de menor quantidade de fosfato para seu desenvolvimento e produção de biomassa seca na presença de S^0 . Richart et al. (2006) obteve melhor IEA para produção de soja quando aplicou 30 kg ha^{-1} de enxofre elementar na dose de 200 kg ha^{-1} de FNR de Gafsa, evidenciando efeito positivo do uso de enxofre elementar na adubação fosfatada.

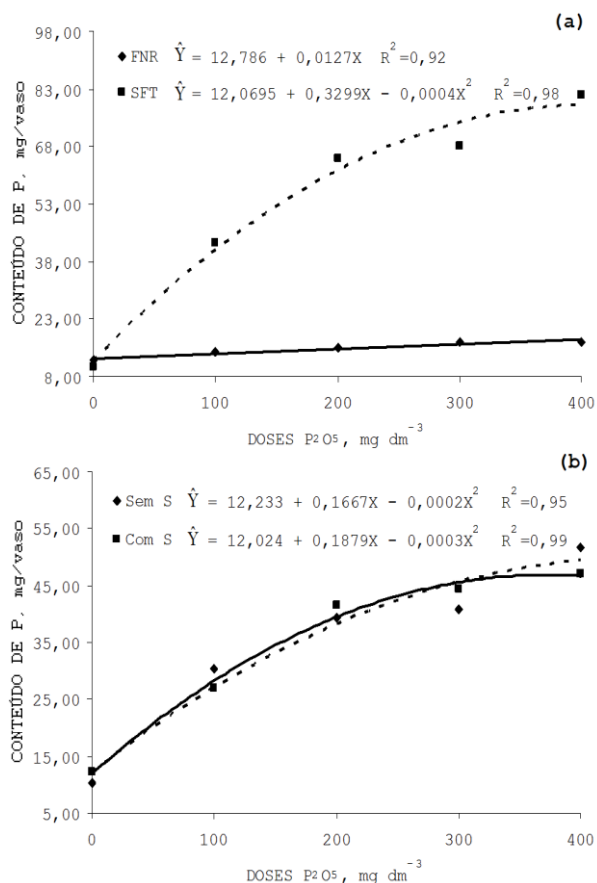


Figura 3. Conteúdo de fósforo foliar em resposta as doses de P_2O_5 do fosfato natural reativo e superfosfato triplo (a) e resposta a adição de enxofre elementar (b).

Para o teor de enxofre no tecido foliar, a fonte de fósforo FNR proporcionou valor 46,7% superior ao SFT. Todavia, na interação fontes versus doses, o SFT proporcionou menor valor de S na dose de $287,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de P_2O_5 (Figura 4a). Para a fonte FNR, observou-se efeito linear crescente do teor de S em função das doses de P_2O_5 , com incremento de $0,0009 \text{ g kg}^{-1}$ de S no tecido foliar para cada mg dm^{-3} de P_2O_5 aplicado (Figura 4a).

Ambas as fontes, SFT e FN apresentam comportamento semelhante no teor de P e S foliar, o que caracteriza a relação existente entre P e S. Entretanto, ocorre de maneira que a resposta das adubações de S proporciona teor foliar adequado para cada cultura e aumento da produtividade somente quando o fósforo também é suprido adequadamente (Alvarez V. et al., 2007). Frandoloso (2006) obteve diminuição dos teores de S no tecido foliar com aumento das doses de P_2O_5 para o SFT em Latossolo Vermelho Eutroférico com teores baixos de P e S ($2,9 \text{ mg dm}^{-3}$ de $P_{\text{Mehlich-1}}$ e $4,46 \text{ mg}$

dm^{-3} de $\text{S}_{\text{Ca}(\text{H}_2\text{HPO}_4)_2}$) e aumento do teor de S foliar com aumento das doses de P_2O_5 para o FNR, na presença de 30 kg ha^{-1} de S^0 , obtendo teores médios na ausência de S^0 .

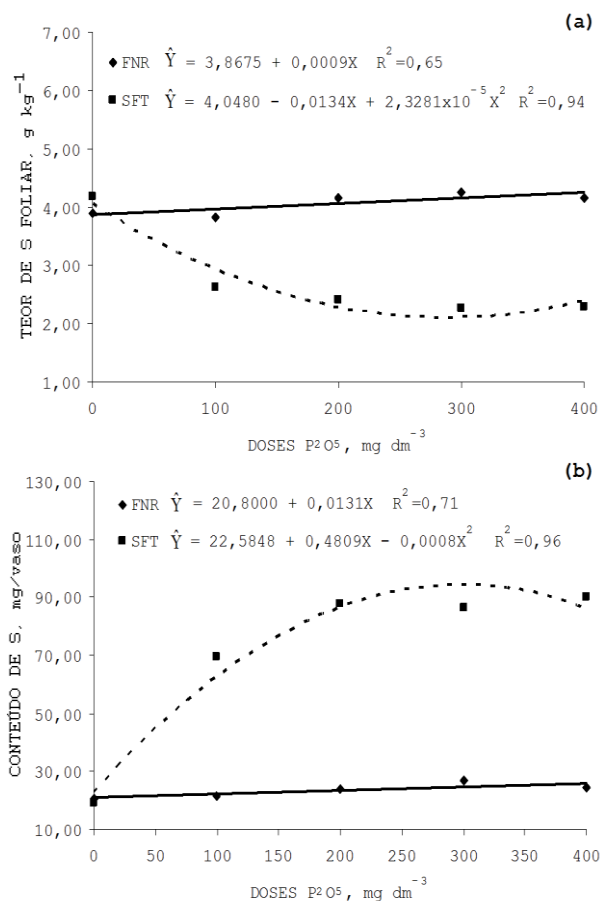


Figura 4. Teor enxofre foliar (a) e conteúdo de enxofre foliar (b) em resposta a doses de P_2O_5 de fosfato natural reativo e superfosfato triplo.

A aplicação de SFT proporcionou conteúdo de S foliar $47,1 \text{ mg/vaso}$ maior em relação a aplicação da fonte FNR (Tabela 2). Na interação fonte versus doses, o SFT dose de $300,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de P_2O_5 proporcionou conteúdo máximo de $94,9 \text{ mg/vaso}$ de S (Figura 4). O FNR apresentou incremento de $0,0131 \text{ mg/vaso}$ para cada mg de P_2O_5 aplicado (Figura 4b). Semelhante ao que ocorreu com o conteúdo de P foliar este comportamento se deve também a resposta quadrática da produção de biomassa seca da parte aérea na fonte SFT (Figura 1) e do aumento linear do teor de S foliar na fonte FNR em função das doses de P_2O_5 .

O efeito da adição de enxofre elementar sobre o conteúdo de S na parte aérea, com teor médio de $45,2 \text{ mg}$ de S sem adição de S^0 , e $48,7 \text{ mg}$ de S com adição de S^0 , (Tabela 2) é resultante da oxidação e liberação de S-SO_4^{2-} disponível às plantas, de

acordo com resultados obtidos por Frandoloso (2006), os quais observaram maior teor de S foliar ao adicionar S⁰ independente de utilizar doses crescentes de FNR ou SFT para cultura do milho.

A eficiência de utilização de fósforo (EUP) e o índice de eficiência agronomia (IEA), foram maiores na dose 100 mg dm⁻³ de P₂O₅ fornecida por ambas as fontes (Tabela 3). A EUP foi maior para todas as doses P₂O₅ fornecidas pela fonte SFT comparado ao FNR sem e com a adição de enxofre elementar, sendo que a adição de S⁰ proporcionou aumento de 3,7% e 2,58% deste índice para as fontes de P, respectivamente; sobretudo, o IEA não foi influenciado pela adição do S⁰. Frandoloso (2006) obtiveram maior eficiência de uso do P (EU) para produtividade em menores doses dos fertilizantes de FNR e SFT, sendo ainda maiores na presença de 30 kg ha⁻¹ de S⁰. Maior EUP foi obtida na dose 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na presença de S⁰ para ambas as fontes. Horowitz e Meurer, (2003b), obtiveram IEA maiores na ordem de 42% e 34,5 % para fosfato natural de Gafsa e fosfato natural Gantour Black, respectivamente em amostras de LVd em milho, na dose de 190 mg dm⁻³ de P em dois cultivos consecutivos após 42 dias. Souza (1997) ressalta que maiores valores de EUP e IEA podem ser obtidos em maiores períodos de tempo, principalmente para o FNR que possui liberação lenta de P.

Tabela 3. Eficiência de utilização do fósforo (EUP) e índice de eficiência agrônômica (IEA) do fosfato natural reativo sem e com adição de enxofre elementar

Doses de P ₂ O ₅	Sem adição enxofre elementar				Com adição enxofre elementar			
	EUP		IEA		EUP		IEA	
	FNR	SFT			Média	FNR		
mg dm ⁻³	-----mg mg ⁻¹ -----			%	-----mg mg ⁻¹ -----			%
0	435,81	450,75	443,28	-	441,54	423,78	432,66	-
100	373,91	567,49	470,70	20,28	424,54	678,60	551,57	22,57
200	368,02	575,41	471,71	15,21	370,97	551,35	461,16	16,16
300	364,03	583,75	473,89	17,17	372,03	543,57	457,80	15,95
400	353,45	459,28	406,37	16,03	356,85	507,38	432,11	14,11
Média	379,04	527,34	453,19	17,17	393,19	540,94	467,06	17,20

O pH do solo aumentou com a utilização do SFT (Tabela 2). Na interação fontes versus doses para o SFT na dose 216,7 mg dm⁻³ de P₂O₅ proporcionou máximo pH de 5,69 (Figura 5). Este potencial de alcalinização do solo é devido à formação de compostos solúveis e insolúveis que ocorrem durante a dissolução do SFT, que foi

máximo até a dose de 216,7 passando a acidificar o meio a partir desta dose. Conforme Prochnow et al. (2004) os fosfatos totalmente acidulados quando dissolvidos ao solo podem formar diferentes compostos, que dependem da própria composição química da rocha fosfática de origem, quantidade aplicada, e do tipo e composição do solo em uso, podendo em determinadas condições formar compostos com potencial de alcalinização ou acidificação do solo. Possivelmente o volume reduzido de solo e as doses elevadas de P_2O_5 tenham influenciado este comportamento, aumentando o pH em doses maiores de P_2O_5 .

No caso da aplicação de FNR proporcionou elevação do pH no solo até a dose de 333,3 $mg\ dm^{-3}$ de P_2O_5 e pH máximo de 5,58 (Figura 5). Isto ocorreu devido à solubilização do FNR liberando carbonato presente na rocha fosfática capaz de neutralizar acidez do solo e elevar o pH (Goedert et al., 1985), contundo com interferência menos acentuada que o SFT. De fato, em trabalho de Korndörfer et al. (1999) não obtiveram variação de pH para as fontes fosfato natural reativo de Gafsa, Marrocos, Arad e superfosfato triplo nem mesmo para a maior dose ($400\ kg\ ha^{-1}$) em experimento de campo.

A redução do pH com a adição de S^0 (Tabela 2) é resultante oxidação do enxofre elementar catalizada pelos fatores abióticos e bióticos do solo, tendo como produto a formação de sulfato (Germida e Janzen, 1993). O LVef utilizado neste trabalho com $706\ g\ kg^{-1}$ de argila, possui alto poder tampão de acidez que pode ter influenciado a avaliação da oxidação do S^0 . Horowitz (2003c) afirma que a redução do pH pela oxidação do S^0 e a própria oxidação é inversamente proporcional ao teor de argila dos solos. Desta forma, a presença de elevada quantidade de argila no solo pode ter impedido maior intensidade de redução no pH do solo.

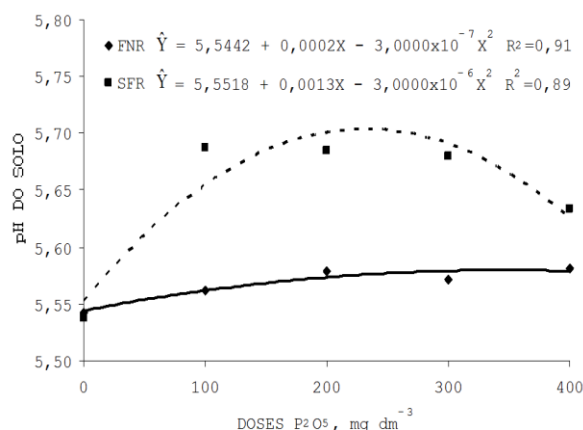


Figura 5. Valores de pH do solo em CaCl₂ em resposta as doses de P₂O₅ do fosfato natural reativo e superfosfato triplo. A barra vertical corresponde a dms na comparação entre fontes pelo teste tukey a 5%.

O efeito das fontes de fósforo sobre os teores de P disponível e de S-SO₄²⁻ disponível no solo, onde o SFT apresentou os menores teores, pode ser em função da maior absorção e conseqüentemente maior conteúdo de P e S na parte aérea para a mesma fonte (Tabela 2). Sobretudo, ressalta-se que o extrator Mehlich-1 (por ser ácido) potencializa a detecção de valores maiores de P disponível no solo (Raij, 1991).

Na interação fontes versus doses de P₂O₅ obteve-se efeito linear crescente para o teor de P disponível no solo para ambas as fontes. Para o FNR houve incremento de 0,272 mg dm⁻³ para cada mg dm⁻³ de P₂O₅ adicionado, enquanto que para o SFT o incremento foi de 0,127 mg dm⁻³ para cada mg dm⁻³ de P₂O₅ adicionado (Figura 6a). Este menor incremento do teor de P disponível no solo com as doses crescentes de P₂O₅ do SFT é conseqüência da maior absorção pelas plantas de milho resultando em maior conteúdo de P na parte aérea (Figura 3a). No entanto, para o FNR o incremento do teor de fósforo disponível (Mehlich-1) no solo não refletiu em maior produção de biomassa seca e conteúdo de P da parte aérea, provavelmente por superestimar os valores de P no solo ao utilizar FNR, solubilizando P que não fica rapidamente disponibilizado para as raízes das plantas (Raij, 1991).

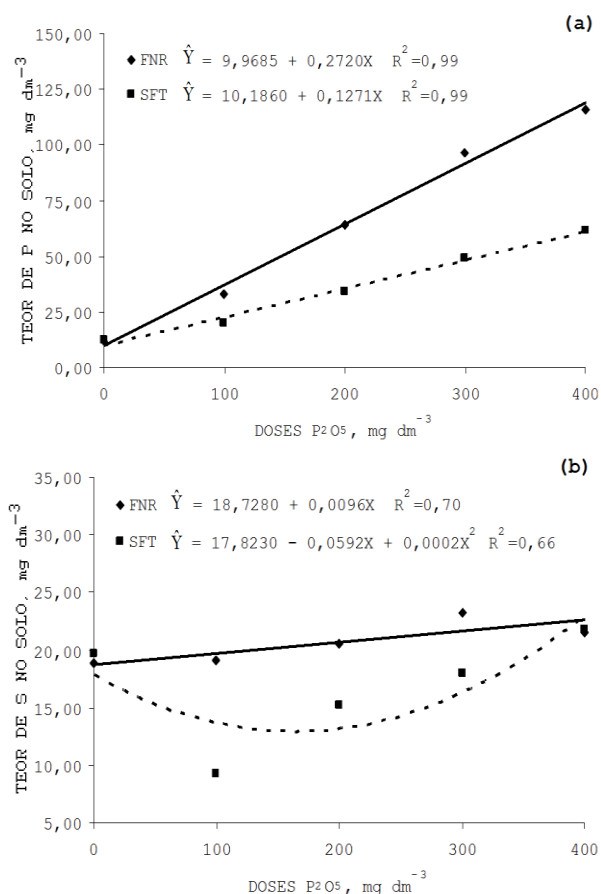


Figura 6. Teor de fósforo no solo (a) e teor de enxofre no solo (b) em resposta as doses de P₂O₅ do fosfato natural reativo e superfosfato triplo.

Assim, o extrator Mehlich-1 utilizado para determinação do P disponível no solo provavelmente superestimou estes valores, principalmente quando aplicado FNR. Segundo Silva et al. (1999), em solos corrigidos com fosfatos naturais, a utilização de extratores ácidos como o Mehlich-1 solubiliza a própria rocha fosfática e superestimam os valores de P disponível no solo, não apresentando boas correlações com os rendimentos das culturas e com as quantidades absorvidas do elemento. Portanto, mesmo que o incremento de P foliar e elevação do pH do solo em função das doses (Figura 2 e 5) representarem solubilização do FNR não foi possível quantificar a real solubilização desta fonte de P. Tal condição, provavelmente relacionada ao menor conteúdo de P (devido baixo incremento de biomassa seca) para a fonte FNR (Figura 1 e 2), que propiciou menor desenvolvimento das plantas por não disponibilizar P suficiente para o adequado desenvolvimento da cultura.

Na Figura 6b é possível observar a interação fontes versus doses para o teor de S-SO₄²⁻ no solo, com resposta da fonte SFT para dose de 148 mg dm⁻³ de P₂O₅ com

mínimo teor de S, $13,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de S-SO_4^{2-} . O comportamento da fonte SFT está relacionado à produção de biomassa seca e conteúdo de S na parte aérea (Figura 1 e 4b), que demonstraram maior absorção de S-SO_4^{2-} . Entretanto, o FNR respondeu linearmente com o aumento das doses de fósforo, apresentando incremento de $0,0096 \text{ mg dm}^{-3}$ por mg dm^{-3} de P_2O_5 aplicado, pois o desenvolvimento das plantas foi inferior ao SFT e com isto não houve dose que intensificou a absorção de S do solo, mantendo elevação dos teores ao incrementar as doses de P_2O_5 .

A aplicação do S^0 no solo promoveu aumento do S-SO_4^{2-} , indicando sua oxidação e formação de sulfato (Tabela 2). Mesmo havendo maior poder tampão para sulfato em solos argilosos, a oxidação do enxofre elementar no período de 30 dias de condução do experimento, promoveu aumento do teor de S-SO_4^{2-} . Horowitz e Meurer (2006) comprovaram oxidação do S^0 a partir do 22º para as diferentes doses de S^0 em Latossolo Vermelho com 470 g kg^{-1} de argila.

Observa-se também tendência de aumento do teor de S-SO_4^{2-} no solo em função das doses para ambas as fontes de P. Possivelmente o aumento do teor de fósforo no solo proporcional ao aumento das doses de P_2O_5 aplicadas, tanto para o SFT por ser mais solúvel como para o FNR, deslocou o sulfato adsorvido para a solução do solo, justificando-se assim o incremento do teor de S-SO_4^{2-} do solo com o aumento na dose de 400 mg dm^{-3} de P_2O_5 (Figura 6b). Solos com elevado teor de argila e óxidos de ferro, características presentes no solo em estudo, apresentam elevada capacidade de adsorção de SO_4^{2-} , mas a aplicação de fosfatos solúveis diminui a adsorção de SO_4^{2-} devido a maior afinidade dos fosfatos com os óxidos de ferro em relação ao sulfato numa mesma condição de pH do solo (Alvarez V., et al., 2007). Dias et al. (1994) avaliando a dinâmica de algumas formas de enxofre em diferentes solos confirmam o efeito do deslocamento de sulfato adsorvido à solução do solo pelo fosfato em Latossolos Amarelos com 35% de argila.

Conclusões

A produção de biomassa seca da parte aérea das plantas de milho foi de $36,7 \text{ g/vaso}$ para fonte superfosfato triplo até a dose de 279 mg dm^{-3} de P_2O_5 enquanto que para fosfato natural reativo foi média de $5,7 \text{ g/vaso}$ para todas as doses em LVEf com $14,09 \text{ mg dm}^{-3}$ de P e $11,61 \text{ mg dm}^{-3}$ de S.

O uso de enxofre elementar indicou menor necessidade de fosfato para atingir o conteúdo máximo de fósforo na parte aérea e proporcionou maior eficiência de utilização do fósforo, porém não influenciou o índice de eficiência agrônômica.

A diminuição do pH e o aumento do teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo com adição do enxofre elementar demonstram sua oxidação, entretanto, não influenciou a solubilização do fosfato natural reativo.

Em condições de cultivo com necessidade de disponibilidade alta de P em estádios iniciais, principalmente em solos com quantidade alta de argila, é adequado utilizar fontes com maior solubilidade imediata (SFT) em relação fonte de liberação mais lenta (FNR).

Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES/PNPD), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (FUNDAÇÃO ARAUCÁRIA), pela concessão de bolsas de estudo.

Referências

ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO JR., E.S.; SOUZA, R.B.; FONSECA, C.A. **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas**. Viçosa: UFV, 2001. 131 p.

ALVAREZ V., V.H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C.H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa – MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap.10, p.595-644.

BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. **Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solo e material vegetal**. Revista Ceres, 21:73-85, 1974.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes destinados à agricultura**, Legislação e Fiscalização. Brasília, 1982. 88 p.

DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa, 1981. (Boletim de extensão 29).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo, Rio de Janeiro. RJ. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SP/Embrapa-CNPS, 2006. 412 p.

FRANDOLOSO, J. F. **Eficiência de adubos fosfatados associado a enxofre elementar na cultura do milho**. Marechal Cândido Rondon, (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

GERMIDA, J.J.; JANZEN, H.H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, Wageningen, Netherlands, v.35, p101-114, 1993.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D.M.G. Avaliação preliminar da eficiência de fosfatos com acidulação parcial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:75-80, 1986.

GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. **Importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta**. Piracicaba, Informações Agronômicas, Potafós, n.95, set. 2001. 16 p.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agronômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. Porto Alegre (Tese de Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003c.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.). **Anais do simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: Potafós, 2004. Cap.24, p.665-682.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais. Piracicaba, **Informações Agronômicas**, Potafós, n.102, jun. 2003a, p.4. (Encarte Técnico).

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p.41-47, jan-fev, 2003b.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Oxidação de enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p. 822-828, mai-jun, 2006.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. Boletim técnico n.3, 31 p.

KORNDÖRFER, G.H.; CABEZAS, W.A.L.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfato naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.2, 1999.

LENZ, P.; TICHY, R.; POL, L.H. Sulfur cycle. In: LEDERBERG, J. (ed.) **Encyclopedia of microbiology**. 2. ed. San Diego, Academic, 2000. p.495-505.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J. de. LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA –SEA, 1991. p.189-254 (Documento, 3).

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, UFV – DPS, 1999, 399 p.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.). **Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba, Potafós, 2004. Cap.23, p.605-651.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafós, 1991. p.182-203.

RESENDE, A.V. de; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; LAGO, F.J. do. Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do cerrado. **Revista Agrotécnica**, Lavras, v.3, p.458-466, maio-jun., 2006.

RICHART, A.; LANA, M. C.; SCHULZ, L. R.; BERTONI, J. C.; BRACCINI, A. L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja e produção de biomassa da aveia na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.30, p.695-705, 2006.

SILVA, F.C. da; RAIJ, B.V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p267-288, 1999.

SOUZA, D.M.G.; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em granulados no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:141-146, 1987.

SOUZA, E.C.A. **Uso agrônômico do fosfato natural**. 2^a ed.rev. Jaboticabal, Funep, 1997. 47p.

STANFORD, N.P.; MOURA, A.M.M.F.; SANTOS, K.S.; SANTOS, P.R. Atuação de *Acidithiobacillus* na solubilização de fosfato natural em solo de tabuleiro cultivado com jacatupé (*Pachyrhizus erosus*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.75-83, 2004.

Recebido para publicação em: 05/04/2015

Aceito para publicação em: 18/09/2015