

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E ENXOFRE PARA A CULTURA DA SOJA NA PRESENÇA DE FOSFATO NATURAL REATIVO, SUPERFOSFATO TRIPLO E ENXOFRE ELEMENTAR⁽¹⁾

Alfredo Richart⁽²⁾, Maria do Carmo Lana⁽³⁾, Loivo Rogério Schulz⁽⁴⁾,
Júlio César Bertoni⁽⁵⁾ & Alessandro de Lucca e Braccini⁽⁶⁾

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo comparar o efeito residual do fosfato natural reativo oriundo do Marrocos (Youssoúfia) em relação ao superfosfato triplo sobre a produção de biomassa de aveia, produtividade e componentes da produção da soja, disponibilidade de P e de S no solo, bem como os teores destes nutrientes no tecido foliar da soja. O trabalho constituiu de dois cultivos utilizando a cultura da soja e da aveia, realizados em sistema de cultivo mínimo. O delineamento experimental utilizado foi de blocos inteiramente casualizados, com quatro repetições, com os tratamentos arranjos em fatorial 2 x 4 x 3, ou seja, dois fertilizantes fosfatados, fosfato natural reativo (FNR) e superfosfato triplo (SFT), com quatro doses de cada fertilizante (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅), e três de S (0, 30 e 60 kg ha⁻¹ S elementar). No tecido foliar, determinaram-se os teores de P e S. No solo, nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm, determinou-se o P disponível. Os resultados indicam que, para o primeiro ano, não houve superioridade do SFT sobre o FNR para produtividade e massa de 100 grãos. A aplicação de SFT proporcionou teores crescentes de P no tecido foliar; por outro lado, não houve efeito da aplicação de doses crescentes de FNR no teor de P. O teor de S no tecido foliar aumentou tanto pela adição das doses crescentes de P quanto pelas doses crescentes de S para ambas as fontes (SFT e FNR).

Termos de indexação: adubação fosfatada, eficiência de fosfatos, *Glycine max*.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor. Recebido para publicação em março de 2005 e aprovado em junho de 2006.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, M.Sc. em Agronomia pelo Programa Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Campus de Marechal Cândido Rondon (PR). CEP 85960-000 Marechal Cândido Rondon (PR). E-mail: alfredo_richart@hotmail.com

⁽³⁾ Professora do Centro de Ciências Agrárias, UNIOESTE. Bolsista do CNPq. E-mail: mclana@unioeste.br

⁽⁴⁾ Acadêmico do Curso de Agronomia, UNIOESTE.

⁽⁵⁾ Engenheiro-Agrônomo, Representante Técnico da Mosaic Fertilizantes do Brasil S/A. E-mail: julio.bertoni@mosaicco.com

⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo, 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista do CNPq. E-mail: albraccini@uol.com.br

SUMMARY: PHOSPHORUS AND SULFUR AVAILABILITY FOR SOYBEAN IN THE PRESENCE OF REACTIVE NATURAL PHOSPHATE, TRIPLE SUPERPHOSPHATE AND ELEMENTAL SULFUR

This study compared the residual effect of reactive natural phosphate originated from Morocco with that of triple superphosphate on the oat biomass production, soybean yield and yield components, availability of phosphorus and sulfur in the soil and determined these nutrient contents in soybean leaf tissue in response to the phosphorus and sulfur sources and doses. The study consisted of soybean and oat crops cultivated under minimum tillage cultivation system. The experiment had a complete randomized block design with four replications and the treatments arranged in a 2 x 4 x 3 factorial design with two phosphate fertilizers, reactive natural phosphate (RNP) and triple superphosphate (TSP), with four rates of each fertilizer (0, 100, 200 and 300 kg ha⁻¹ of P₂O₅) respectively, and three rates of sulfur (0, 30 and 60 kg ha⁻¹ elemental S). The phosphorus and sulfur content was evaluated in the leaf tissue. Available phosphorus in the soil was evaluated at depths of 0–10 and 10–20 cm. Results indicate that in the first year the triple superphosphate source did not perform better than the reactive natural phosphate source regarding the productivity and mass of 100 grains. The TSP application led to increasing P concentrations in the leaf tissue, but there was no effect of the application of increasing RNP doses on the leaf phosphorus concentration. The S concentration in the leaf tissue increased in response to the higher phosphorus and sulfur doses as TSP and RNT fertilizers.

Index terms: phosphate fertilization, phosphate efficiency, Glycine max (L) Merrill.

INTRODUÇÃO

Derivado de diferentes fontes, o P é um nutriente que se apresenta em várias formas químicas. Assim, diversos adubos fosfatados são encontrados no comércio, distinguindo-se na concentração de P e na sua reatividade (Raij, 1991). Dentre estas fontes, os fosfatos naturais (FNs) têm ocupado posição de destaque como sucedâneos às aplicações de fosfatos acidulados. Entretanto, a eficiência destes fosfatos depende de fatores relacionados com suas características intrínsecas, com as propriedades do solo, com as práticas de manejo e com as características da planta (Khasawneh & Doll, 1978; Chien & Menon, 1995; Rajan et al., 1996).

Segundo Syers et al. (1986), uma das características importantes dos FNs é sua reatividade química, estimada por meio de sua solubilidade em solventes orgânicos. Léon et al. (1986) afirmam que a solubilidade em ácido cítrico a 2 % tem sido considerada adequada para interpretar o comportamento agrônomico dos FNs, isto é, os mais solúveis nesse extrator são os que, em geral, mostram-se mais eficientes nas adubações. Dessa forma, um fosfato de rocha é considerado reativo se 30 % ou mais do P total é solúvel em solução de ácido cítrico 2 % (Sale & Mokwunye, 1993). Resultados obtidos por Khasawneh & Doll (1978), com aplicação de FNs em solos cultivados em sistemas de produção, evidenciam a possibilidade de seu uso prático, mormente em solos com pH menor

que 6,0, pois tem sido verificado que, à medida que aumenta o pH, a eficiência desses fertilizantes diminui.

Conforme Lens et al. (2000), a lenta solubilidade dos FNs constitui-se numa das limitações para seu uso “*in natura*”, mesmo os fosfatos naturais reativos (FNR) devem ter condições propícias para que seu efeito seja otimizado e fornecer o P necessário às culturas. Assim sendo, têm sido estudadas alternativas para se estimular a solubilização dos fosfatos, como a adição de S elementar (S⁰), o qual é oxidado no solo por microrganismos do gênero *Thiobacillus*, favorecendo a solubilização dos FNR, bem como fornecendo S, originalmente insolúvel na forma de S-elementar.

Este trabalho teve por objetivo comparar o efeito residual do fosfato natural reativo oriundo do Marrocos (Youssoufia), em relação ao superfosfato triplo, sobre a produção de biomassa de aveia, produtividade e componentes da produção da soja, disponibilidade de P e de S no solo, bem como o efeito destes nutrientes no tecido foliar da soja.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no município de Marechal Cândido Rondon – PR (24° 33' 40" S e 54° 04' 00" W), em área da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. O clima que

caracteriza a região, segundo cartas climáticas básicas editadas pelo IAPAR (1978), é do tipo subtropical úmido com temperaturas médias variando de 15 a 28 °C.

O trabalho foi constituído de dois cultivos, um no período da primavera-verão de 2002/2003, utilizando-se a soja, cultivar CD-202, e o segundo, no período de outono/inverno de 2003, utilizando-se a aveia, sendo as sementes de um cultivar comercial de aveia branca OR-1, ambos realizados em sistema de cultivo mínimo.

O delineamento experimental utilizado consistiu de blocos inteiramente casualizados, com quatro repetições, com os tratamentos arranjos em fatorial 2 x 4 x 3, ou seja, dois fertilizantes fosfatados, fosfato natural reativo (FNR com 30 % de P₂O₅ total e 10 % solúvel em ácido cítrico) e superfosfato triplo (SFT com 45 % de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico), quatro doses de cada fertilizante (0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e três de S (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de S elementar). As quantidades de cada fonte de P foram calculadas com base no teor de P₂O₅ solúvel, para o SFT, e no teor de P₂O₅ total, para o FNR. Cada unidade experimental constituiu de quatro fileiras de 5,0 m de comprimento por 2,0 m de largura. A parcela útil foi obtida eliminando-se 0,50 m de cada extremidade, abrangendo uma área útil de 4,0 m² por parcela.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico (Embrapa, 1999). Previamente, foi feita uma coleta de amostras de solo para avaliação do teor de argila e das propriedades químicas do solo (Quadro 1). Os tratamentos foram distribuídos a lanço dentro da parcela, incorporados a 5,0 cm de profundidade, com auxílio de uma grade niveladora. Em seguida, foi semeado o milho, utilizado como planta de cobertura. A aplicação dos tratamentos foi realizada 80 dias antes da semeadura da cultura da soja.

No início do florescimento da cultura da soja, realizou-se coleta das folhas para análise de tecido vegetal. Foram coletadas 10 folhas recém-maduras com pecíolo, no pleno florescimento da cultura, ao acaso, dentro da parcela, conforme método descrito por Malavolta et al. (1997). As folhas foram

acondicionadas em sacos de papel e levadas ao laboratório, onde foram lavadas e secas em uma estufa de ventilação forçada a 65 °C, por 72 h, e, posteriormente, moídas e homogeneizadas, preparadas para a determinação dos teores de P e S, em amostras de tecido foliar por meio de digestão nítrico-perclórica. Nos extratos, o teor de P foi determinado segundo método de Tedesco et al. (1985) e o S dosado por turbidimetria, segundo método de Alvarez V. et al. (2001).

Para determinar a produção de biomassa seca para a cultura da soja, foram coletadas 10 plantas da parcela experimental, cortando-as rente à superfície do solo, após a colheita. O material foi levado para secar em estufa de circulação forçada a 65 °C, até atingir massa constante, e então pesado para avaliação da umidade e posterior avaliação da biomassa seca por parcela. A produtividade da soja foi obtida, efetuando-se a colheita da área útil, que foi de 4 m², tendo sido as plantas levadas para um galpão para ser trilhadas, obtendo-se, então, por pesagem dos grãos, a produtividade. O número de vagens por planta foi obtido no momento da colheita, coletando-se 10 plantas aleatoriamente da parcela e contou-se o número de vagens de cada planta, das quais 10 vagens foram selecionadas, aleatoriamente, obtendo-se o número de grãos de cada vagem. A massa de 100 grãos foi obtida pelo cálculo da média de quatro subamostras de 100 grãos tomadas ao acaso dos grãos colhidos.

No solo, foram coletadas amostras em duas profundidades, de 0–10 e 10–20 cm, de cada parcela experimental. O P disponível foi pelo uso dos extratores Mehlich-1 e resina de troca aniônica. Foi avaliado o teor de S disponível pelo extrator Ca(H₂PO₄)₂ em HOAc 2 mol L⁻¹ e dosado por turbidimetria, segundo método de Alvarez V. et al. (2001).

Após o cultivo da soja, foi semeada a aveia branca. Para determinar a produção de biomassa seca para cultura da aveia, coletou-se 0,5m² aleatoriamente dentro de cada parcela experimental, cortando as plantas rente à superfície do solo, quando estavam no estágio de enchimento de grãos. O material foi levado para secar em estufa de circulação forçada a 65 °C, até atingir massa constante, pesado em balança

Quadro 1. Resultados da análise de fertilidade do solo nas camadas de 0–10 e 10–20 cm

Profundidade	P ⁽¹⁾	M.O. ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	H + Al	Al ³⁺	K ⁽¹⁾	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	SB	CTC	V	Argila
cm	mg dm ⁻³	g dm ⁻³					cmolc dm ⁻³			%	g kg ⁻¹	
0–10	10	19	5,4	5,4	0,0	0,6	5,8	3,2	9,7	15	64	750
10–20	5	8	5,3	5,4	0,0	0,4	5,4	2,8	8,7	14	62	750

⁽¹⁾ Extrator Mehlich-1. ⁽²⁾ Método Walkley-Black. ⁽³⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. ⁽⁴⁾ KCl 1 mol L⁻¹.

de precisão para determinação da umidade e posterior avaliação da biomassa seca por parcela.

O índice de eficiência agrônômica do FNR foi estimado por $IEA = [(MS \text{ tratamento}) / (MS \text{ superfosfato triplo})] \times 100$, em que MS é a produção de biomassa seca da parte aérea da soja e da aveia, bem como foi estimado o IEA para produtividade da soja. Também foi calculada a variação percentual da produtividade da soja e produção de biomassa seca da soja e da aveia para cada dose de P_2O_5 e S em relação à testemunha pela fórmula $[1 - (MS \text{ tratamento} / MS \text{ testemunha})] \times 100$.

Os dados de produção de biomassa seca total da soja e da aveia, produtividade, número de grãos por vagem e massa de 100 grãos foram submetidos à análise de variância e de regressão e comparados pelo teste F a 1 e 5 %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Componentes da produção para cultura da soja

As variáveis produtividade e massa de 100 grãos não foram influenciadas pelas doses de P_2O_5 , doses de S e fontes de P (Quadro 2). Para os componentes biomassa seca total, número de grãos por vagem e número de vagens por planta, houve superioridade do

SFT em relação ao FNR. Para as variáveis massa de 100 grãos e produtividade, não houve efeito significativo das fontes, evidenciando que em solos com adequada disponibilidade de P, caso do presente trabalho, os fosfatos se equivaleram no fornecimento de P para as plantas. Resultados semelhantes foram encontrados por Kaminski & Peruzzo (1997), comparando o uso de fosfatos solúveis e reativos para diferentes classes de fertilidade quanto ao P.

Produção de biomassa seca da aveia

A resposta em produção de biomassa seca de aveia (MS) foi linear para ambas as fontes de P (Figura 1a,b); entretanto, a fonte SFT apresentou as maiores produções de biomassa seca, provavelmente, em decorrência do maior efeito residual de P para as plantas de aveia. Sabe-se que as características de reatividade das fontes de P são de grande importância em relação à sua eficiência. Os fosfatos de maior reatividade, sendo mais prontamente disponíveis, favoreceriam a absorção e o aproveitamento do nutriente, principalmente pelas culturas de ciclo curto (Bedin et al., 2003). Ao contrário dos fosfatos solúveis, os fosfatos naturais apresentam uma solubilização mais lenta, podendo ocorrer um aumento gradativo da disponibilidade P (Novais & Smyth, 1999).

Segundo Korndörfer (1978), como consequência das reações de adsorção e apesar das grandes diferenças

Quadro 2. Comparações de médias para os componentes da produção, produtividade, biomassa seca total da soja, número de vagens por planta, massa de 100 grãos e número de grãos por vagem, de acordo com a aplicação de doses fosfato natural reativo (FNR) e superfosfato triplo (SFT) na cultura da soja

Fonte de P	Dose de P_2O_5				Média
	0	100	200	300	
kg ha ⁻¹					
Biomassa seca total, kg ha ⁻¹					
FNR	5.365	5.548	5.454	5.915	5.570 b
SFT	5.792	5.921	6.306	6.198	6.054 a
Produtividade da soja, kg ha ⁻¹					
FNR	2.051	1.929	2.255	2.208	2.111 a
SFT	2.321	2.114	2.312	2.350	2.274 a
Número de vagens por planta					
FNR	48,33	47,37	53,23	48,92	49,46 b
SFT	56,13	48,82	55,64	57,85	54,61 a
Massa de 100 grãos, g					
FNR	13,13	13,19	13,42	13,33	13,27 a
SFT	13,35	13,23	13,51	13,31	13,35 a
Número de grãos por vagem					
FNR	2,20	2,22	2,26	2,19	2,22 b
SFT	2,23	2,23	2,34	2,30	2,28 a

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste F a 5 %.

de reatividade entre os vários fosfatos naturais, estes, de modo geral, apresentam menor eficiência que os fosfatos industrializados solúveis a curto prazo, porém, a longo prazo, seu efeito residual é geralmente maior. Neste contexto, o efeito residual do FNR não se igualou ao do SFT no segundo cultivo. Os resultados mostram tendência de aumento do efeito residual para o SFT (Figura 1b). Comparando a produção de biomassa seca da aveia em relação à dose de P_2O_5 , observa-se que o SFT foi mais eficiente que o FNR (Figura 1a). Quanto ao efeito das doses de S (Figura 1c, d), para a fonte FNR, o valor estimado foi igual à média 6.296 kg ha^{-1} de biomassa seca, ou seja, não houve efeito das doses de S para a fonte FNR. Para a fonte SFT, à medida que aumentou a dose de S, aumentou a produção de biomassa seca da aveia.

Índice de eficiência agrônômica (IEA)

O Índice de Eficiência Agrônômica (IEA) do FNR foi calculado para a produção da biomassa seca da parte aérea da soja e da aveia e produtividade da soja, tomando-se o SFT como fonte de referência. Foi calculado o IEA para cada dose de S dentro das doses de P_2O_5 (Quadro 3).

Para a produtividade da soja, o IEA, com aplicação de doses de S sem P, foi de 92 % com a dose de 60 kg ha^{-1} . Isto indica um efeito benéfico do S na produtividade da soja. Observou-se também um

aumento do IEA para as doses de 100 e 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 em relação às doses de S. No entanto, para dose de 300 kg ha^{-1} de P_2O_5 , o IEA foi de 104 %, sem adição de S. O maior IEA para esta variável foi obtido com 200 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 30 kg ha^{-1} de S, sendo atingido o valor de 106 % (Quadro 3). Vitti & Malavolta (1985) notaram efeitos positivos da utilização de 15 a 50 kg ha^{-1} de S na forma de gesso agrícola em várias culturas. Portanto, a associação das fontes de P com doses de S foi benéfica para o incremento da produtividade, pois houve contribuição do S para melhorar a eficiência da fonte FNR em relação ao SFT. Tais resultados podem ser tomados como evidência indireta da oxidação do S elementar e possível solubilização do FNR.

Horowitz & Meurer (2003), trabalhando com dois fosfatos naturais reativos farelados, Gafsa e Gantour Black, com diferentes tamanhos de partículas para cultura do milho, verificaram que estes produtos farelados, na forma em que são oferecidos no comércio, apresentaram IEA de 93 %, para o fosfato de Gafsa, e de 75 %, para o de Gantour Black, no primeiro cultivo, e valores de IEA de 58 %, para o Gafsa, e de 30 %, para o Gantour Black, no segundo cultivo. No presente trabalho, foram obtidos valores de IEA superiores aos citados em todos os tratamentos.

De forma geral, a adição de S resultou em aumento do IEA para a produção de biomassa seca de soja. Na ausência de P e com 60 kg ha^{-1} de S, o IEA foi igual a

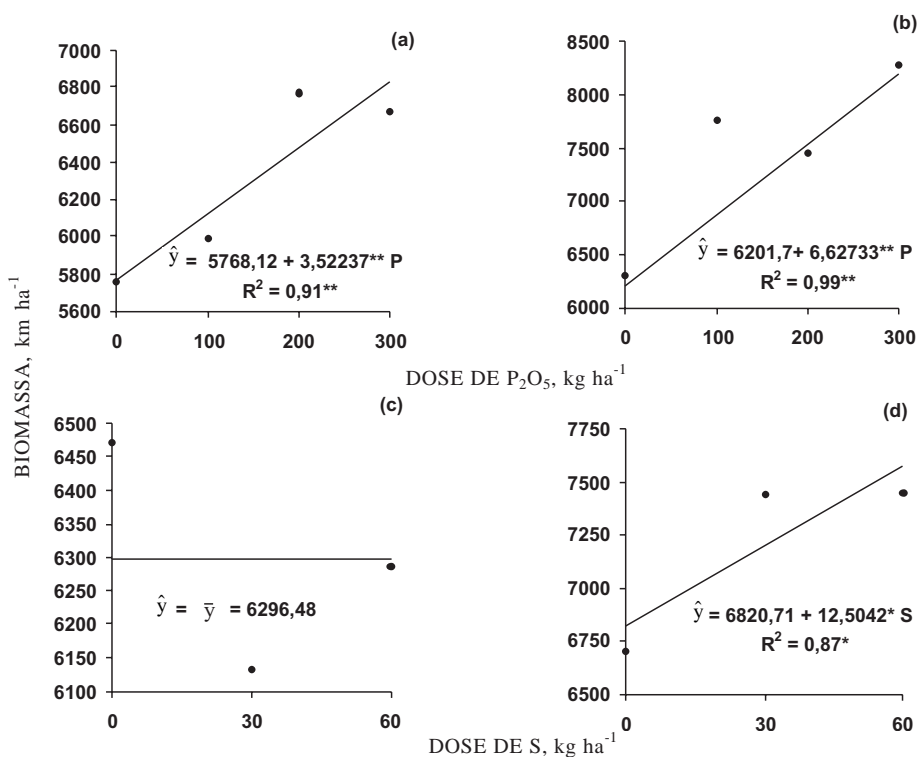


Figura 1. Produção de biomassa seca da aveia, de acordo com as doses de fosfato natural reativo (a), de superfosfato triplo (b) e doses de enxofre para as fontes fosfato natural reativo (c) e superfosfato triplo (d).

Quadro 3. Índice de Eficiência Agronômica (IEA) para produção de biomassa seca da soja, produtividade da soja e produção de biomassa seca da aveia, de acordo com as doses de fosfato natural reativo, e de enxofre elementar em relação ao superfosfato triplo

Dose de P ₂ O ₅	Dose de S	Variável		
		Biomassa soja	Produtividade da soja	Biomassa aveia
————— kg ha ⁻¹ —————				
0	0	82	91	96
	30	91	82	88
	60	107	92	92
100	0	85	82	107
	30	93	97	82
	60	104	97	80
200	0	83	96	99
	30	87	106	87
	60	89	90	87
300	0	111	104	87
	30	86	92	75
	60	91	86	81

107 %. Para dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a adição de S foi benéfica, ocorrendo aumento gradativo do IEA com o aumento das doses de S, obtendo um IEA de 104 % com 60 kg ha⁻¹ de S. O maior IEA para esta variável foi obtido com adição de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ sem S, atingindo o valor de 111 %.

Para a produção de biomassa seca de aveia, observou-se o mesmo comportamento do encontrado nas variáveis produtividade e biomassa seca da soja, nas quais as doses de S sem adição de P apresentaram IEA de 92 % com 60 kg ha⁻¹ de S. O maior IEA foi para dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ sem adição de S, atingindo 107 %. Em trabalho realizado por Moreira et al. (2002) com duas espécies forrageiras (alfafa e centrosema) e quatro fontes de P (superfosfato triplo, termofosfato Yoorin, fosfato natural da Carolina do Norte e Arad) e seis cultivos em vasos em um Latossolo Amarelo distrófico, para a alfafa, o termofosfato Yoorin apresentou o mais alto IEA na soma dos seis cortes. Para centrosema, os fosfatos naturais aumentaram a eficiência do primeiro ao sexto corte, quando comparados com o superfosfato triplo, na média das doses, em 32 %, enquanto o termofosfato decresceu 37 %.

No quadro 4, encontram-se os valores de variação percentual entre a testemunha e as doses de P₂O₅ e S para cada fonte, para as variáveis produção de biomassa seca da soja, produtividade da soja e produção de biomassa seca da aveia. Observa-se incremento ou redução de acordo com a associação, de doses de P₂O₅ e doses de S para ambas as fontes. Para a fonte SFT, a associação tanto da dose de 200

quanto da dose de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com 30 kg ha⁻¹ de S, proporcionou um incremento de 15 % da produtividade. O maior incremento da produção de biomassa seca da soja foi obtido com a associação de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de S, obtendo também um incremento de 49 % da produção de biomassa seca de aveia com esta mesma dose de P₂O₅ associada a 60 kg ha⁻¹ de S. Com a utilização do FNR, a associação de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com 30 kg ha⁻¹ de S proporcionou incremento de 23 % da produtividade da soja em relação à testemunha. Para a produção de biomassa seca da soja, houve incremento de 15 % com 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e incremento de 20 % da produção de biomassa seca da aveia com associação de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de S.

A adição de 60 kg ha⁻¹ de S associado a qualquer dose de P foi prejudicial para a produtividade da soja para ambas as fontes de P. Por outro lado, maior incremento da produção de biomassa seca de aveia foi obtido com a associação de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ com 60 kg ha⁻¹ de S para ambas as fontes de P.

Fósforo no tecido foliar

Os resultados para P no tecido foliar da soja (Figura 2) apontam, na média das duas fontes (Figura 2a), que houve superioridade da fonte SFT sobre a fonte FNR, ou seja, a resposta da cultura em acumular P no tecido foliar pela aplicação de SFT foi linear e altamente significativa ($p < 0,01$). O ponto máximo foi observado com a dose de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e o teor máximo foi de 0,42 dag kg⁻¹ de P. Na

presença de FNR, não houve resposta significativa, sendo o teor médio de $0,35 \text{ dag kg}^{-1}$ de P. Esses resultados mostram que a fonte SFT disponibilizou mais P para as plantas ao longo do ciclo da cultura da soja do que o FNR.

A associação de doses de S beneficiou o FNR (Figura 2b), sendo estas diferenças significativas ($p > 0,1$). Esses resultados indicam efeito positivo da associação de doses S-elementar com doses da fonte FNR, na dose de 60 kg ha^{-1} de S, aumentando o acúmulo de P no tecido foliar da soja. O ponto de mínimo foi de 30 kg ha^{-1} de S-elementar e o mínimo da função foi de $0,336 \text{ dag kg}^{-1}$ de P no tecido foliar. Este aumento na concentração de P foliar em função das doses de S pode ser atribuído à influência do S na redução do pH do solo, o qual favoreceu a solubilização do FNR.

Enxofre no tecido foliar

Os resultados mostram que houve diferenças altamente significativas ($p < 0,01$) entre associação de doses de S com doses de P_2O_5 sobre os teores foliares de S (Figura 3). Esses resultados indicam que o S está sendo disponibilizado para a soja,

provavelmente pela solubilização do S elementar no solo pelas bactérias do gênero *Thiobacillus*.

Verificou-se efeito negativo para as doses de P_2O_5 e efeito positivo para as doses de S, para ambas as fontes, no teor foliar de S. No entanto, a interação positiva para as doses de S caracteriza-se pela necessidade de S, conforme se aumentam as doses de P_2O_5 . Este comportamento é verificado para ambas as fontes, mostrando a similaridade nos resultados e até nos modelos estabelecidos para cada fonte. Para a fonte FNR, observa-se que o mínimo da função foi atingido, quando se adicionaram ao solo $140,34 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 , associados com a dose de $45,74 \text{ kg ha}^{-1}$ de S, sendo estas doses necessárias para obter a concentração de $0,26 \text{ dag kg}^{-1}$ de S no tecido foliar. Para a fonte SFT, observa-se que o mínimo da função foi atingido quando se adicionaram ao solo $339,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 , associados à dose de $53,72 \text{ kg ha}^{-1}$ de S, sendo tais doses necessárias para se obter a concentração de $0,513 \text{ dag kg}^{-1}$ de S no tecido foliar. Segundo Sfredo et al. (1986), as concentrações de $0,26$ e $0,513 \text{ dag kg}^{-1}$ de S no tecido foliar enquadram-se nos níveis suficiente a médio e alto, respectivamente, para o FNR e SFT. Esses resultados indicam que a adição de S-elementar

Quadro 4. Variação percentual da produção de biomassa seca da soja, produtividade da soja e biomassa seca da aveia, de acordo com as doses de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar em relação à ausência de adubação com fósforo

Dose de P_2O_5	Dose de S	Variação percentual		
		Biomassa soja	Produtividade da soja	Biomassa aveia
kg ha ⁻¹		%		
Fosfato natural reativo				
100	0	-8,54	-13,14 ⁽¹⁾	+10,99 ⁽²⁾
	30	+2,96	+10,26	-13,01
	60	+4,29	-11,78	+0,98
200	0	-5,82	+2,58	+19,50
	30	+5,98	+22,77	+4,32
	60	-6,41	-14,41	+13,69
300	0	+15,28	+7,40	+13,67
	30	+9,24	+6,73	-0,80
	60	-6,47	-10,62	+20,20
Superfosfato triplo				
100	0	+7,45	+6,09	+3,83
	30	+10,75	-7,47	+5,93
	60	+0,39	-8,75	+26,86
200	0	+13,00	+6,80	+21,18
	30	+21,32	+15,55	+20,17
	60	+5,18	-4,35	+29,95
300	0	+3,75	+3,54	+30,23
	30	+27,37	+15,42	+32,88
	60	+3,06	+4,09	+49,05

⁽¹⁾ Valores negativos indicam redução em relação à testemunha. ⁽²⁾ Valores positivos indicam incremento em relação à testemunha.

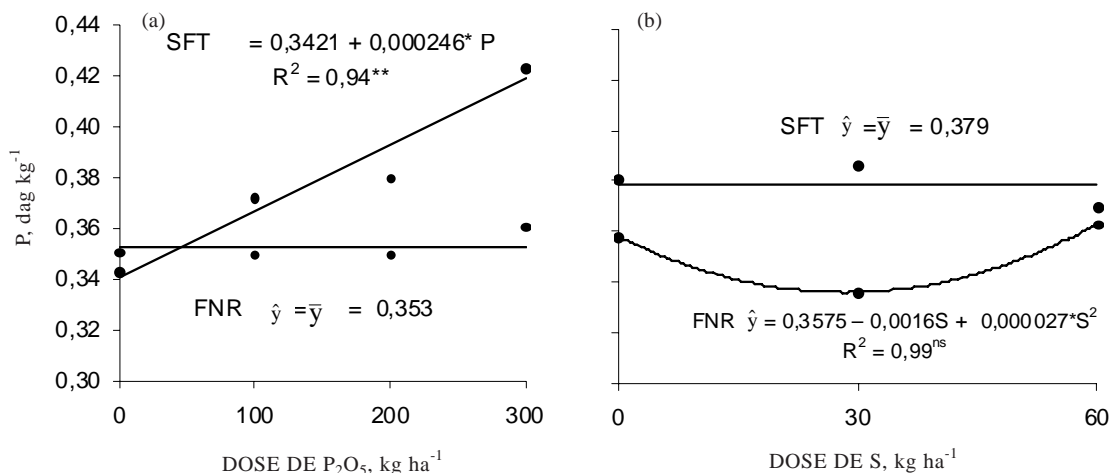


Figura 2. Teores de fósforo no tecido foliar, de acordo com as doses de fósforo (a) e de enxofre (b) para as fontes de superfosfato triplo e fosfato natural reativo.

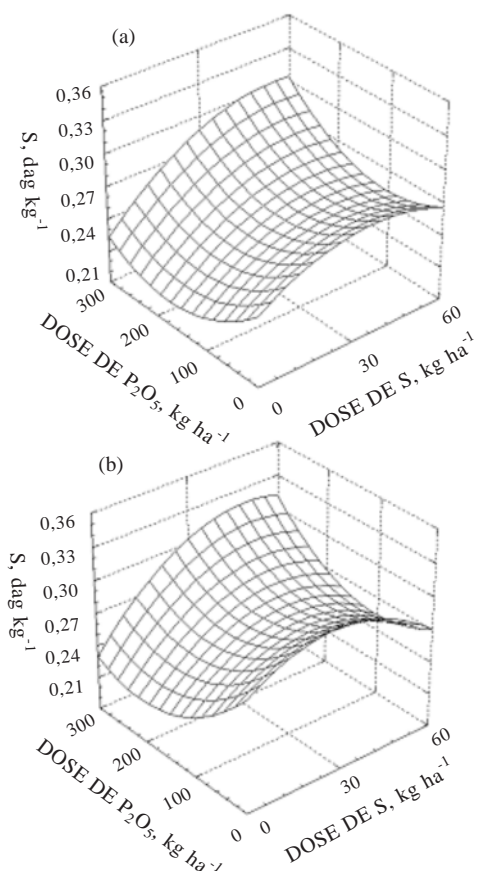


Figura 3. Superfície de resposta, relacionando teores de enxofre no tecido foliar da soja (y), função da aplicação de doses de fósforo (x) e doses de enxofre (z) para as fontes: (a) fosfato natural reativo $\hat{y} = 0,229729 - 0,000383544 P + 0,00245964^{**} S + 0,00000136647^{*} P^2 - 0,000026885^0 S^2$ ($R^2 = 0,54^{**}$) e b) superfosfato triplo $\hat{y} = 0,283781 - 0,000625242^{**} P + 0,00196238S + 0,00000148645^{*} P^2 - 0,0000365502^{*} S^2 + 0,00000529256^{*} PS$ ($R^2 = 0,67^{**}$); $^0, ^*, ^{**}$ = coeficientes da equação significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

ao solo supriu as necessidades de S para a cultura da soja. Os resultados encontrados neste trabalho assemelham-se aos encontrados por FNIE (1974), o qual afirma que as leguminosas necessitam de 40 kg ha^{-1} de S, e estão de acordo com as recomendações técnicas para a cultura da soja, entre 30 e 60 kg ha^{-1} de S (Embrapa Soja, 2003).

Fósforo no solo

Na profundidade de $0-10 \text{ cm}$, houve efeito significativo ($p < 0,01$) da dose de P, mas não houve diferença significativa entre a fontes FNR e SFT (Figuras 4 e 5). Observa-se que a concentração de P na profundidade de $0-10 \text{ cm}$, para ambas as fontes, apresentou tendência quadrática, isto é, estabilizando nas doses mais elevadas. Isto significa que o ponto de máxima foi de 276 kg ha^{-1} de P_2O_5 e máximo da função foi de $37,9 \text{ mg dm}^{-3}$ de P (Figura 4). A aplicação de FNR na superfície influenciou o teor de P no solo na profundidade de $10-20 \text{ cm}$ (Figura 4c). O teor de P no solo aumentou linearmente com o acréscimo das doses de FNR. Não houve efeito da adição de SFT nos teores de P na profundidade de $10-20 \text{ cm}$ (Figura 4d).

A interação de doses de P_2O_5 e doses de S foi significativa ($p < 0,1$) apenas para a fonte SFT (Figura 5a, b). Com o aumento das doses de P_2O_5 , aumentaram também os valores de P; no entanto, houve significativa redução nos teores de P com o aumento das doses de S. As doses de S podem ter interferido no processo de adsorção de P. Segundo Araújo & Salcedo (1997), a adição de sulfato ao solo altera preferencialmente as frações inorgânicas de P, diminui o número de sítios disponíveis e a energia de adsorção (Bolan et al., 1988), ou seja, a adição de sulfato favoreceria a movimentação do fosfato no solo por diminuir-lhe a retenção. O ponto de máximo foi a dose de $300 \text{ kg ha}^{-1} P_2O_5$ e para as doses de S foi de

60 kg ha⁻¹, com o máximo da função em 58 mg dm⁻³ de P, extraídos pela resina de troca aniônica, na profundidade de 0–10 cm, para fonte SFT.

A interação de doses de P₂O₅ e de S apresentaram efeito linear e significativo (p<0,01), na profundidade de 10–20 cm, com aplicação de SFT (Figura 5b). Desta forma, o ponto de máximo foi para a dose de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e o máximo da função foi 49,5 mg dm⁻³ de P extraído pela resina de troca de aniônica.

Enxofre no solo

Observa-se que houve interação significativa (p < 0,01) entre doses de P₂O₅ e de S com a fonte FNR, para o teor de S no solo na profundidade de 0–10 cm (Figura 6). O ponto de máximo foi obtido com a dose de 89,87 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 43,38 kg ha⁻¹ de S, resultando num máximo da função de 1,0 mg dm⁻³ de S no solo para fonte FNR, enquanto, para o SFT, não houve diferença significativa no teor de S no solo na profundidade de 0–10 cm.

Segundo Raij (1991), o sulfato enfrenta, no solo, três fatores que dificultam a sua permanência. O primeiro é a presença de teores maiores de matéria orgânica, que reduz a adsorção por óxidos e aumenta a carga negativa do solo, portanto, repelindo sulfatos. O segundo é a aplicação freqüente de calcário, causando o aumento do pH e a liberação de sulfatos adsorvidos. Finalmente, os fosfatos aplicados em adubações

ocupam preferencialmente as posições de troca que seriam ocupados por sulfatos. Este fato é evidenciado na maior dose de P aplicada, em que houve resposta da adição do S-elementar, ocorrendo maior disponibilidade de S no solo.

A aplicação de S-elementar ao solo deveria aumentar sua concentração; isto não aconteceu, possivelmente, pela lixiviação do sulfato, visto que os teores encontrados variaram de 0,95 a 1,2 mg dm⁻³ de S. Estes teores são extremamente baixos, ou seja, não há praticamente S no solo na camada de 0–10 cm. Os valores de S no solo (Figura 6) não atingem um terço do teor baixo, o qual é de 5,0 mg dm⁻³ de S (Sfredo et al., 1999).

Segundo Nogueira & Melo (2003), o teor de S no solo é influenciado pela precipitação pluvial, temperatura, adubação, manejo dos restos culturais e fertilizantes utilizados. Possivelmente, estas variações climáticas no período de agosto de 2002 até março de 2003 deve-se, especialmente, ao regime pluvial. A distribuição das chuvas nesse período foi normal. É provável que o regime pluvial tenha sido um dos responsáveis pelas variações nos teores de S-sulfato no solo.

Melo & Ferreira (1983) citaram que a elevação dos teores de S-sulfato resultante da aplicação de superfosfato simples em Latossolo Roxo perdurou até 106 dias, diminuindo em seguida. Essas observações, corroboradas pelos resultados aqui apresentados,

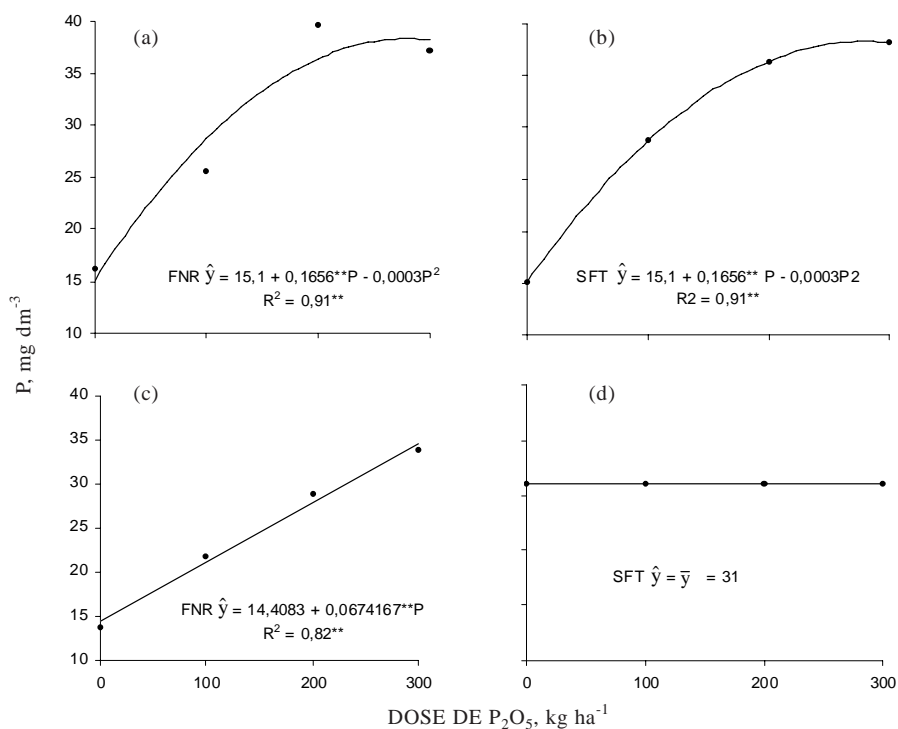


Figura 4. Concentração de fósforo no solo extraído pela resina de troca aniônica nas profundidades de 0–10 cm e 10 a 20 cm, respectivamente, para as fontes fosfato natural reativo (a, c) e superfosfato triplo (b, d), de acordo com a aplicação de doses de P₂O₅.

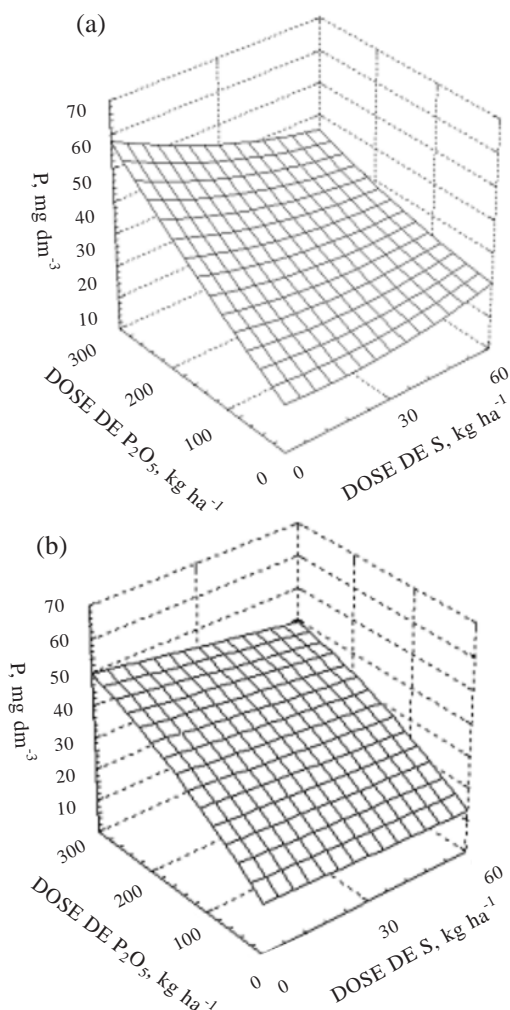


Figura 5. Superfície de resposta, para a concentração de fósforo no solo extraído pela resina de troca aniônica como variável da fonte superfosfato triplo: a) profundidade de 0–10 cm: $\hat{y} = 13,1458 + 0,143958^{**} P + 0,0954167^{NS} S - 0,00158750^{**} PS$ ($R^2 = 0,94^{**}$) e b) profundidade de 10–20 cm, $\hat{y} = 19,3979 + 0,100333^{**} P - 0,113542^{*} S$ ($R^2 = 0,82^{**}$), ** = coeficientes significativos a 5, 1 %, respectivamente.

reforçam, mais uma vez, a rapidez com que o íon sulfato é removido do perfil, e que mais atenção deve ser dada ao S, para que esse não venha a ser limitante às culturas, especialmente em solos com baixos teores de matéria orgânica, sua principal reserva.

CONCLUSÕES

1. Para o primeiro ano, não houve superioridade do superfosfato triplo (SFT) sobre o fosfato natural

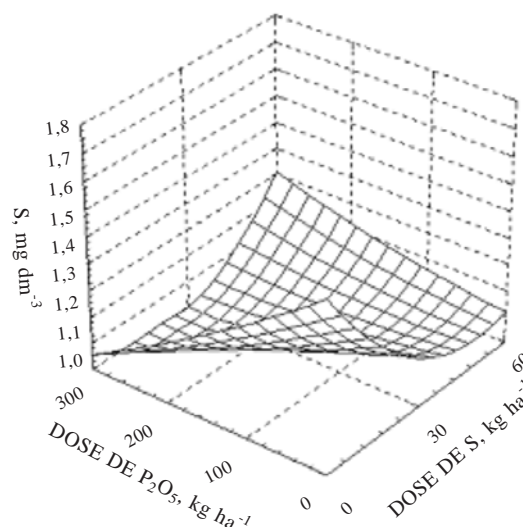


Figura 6. Concentração de enxofre no solo (dados transformados por $\sqrt{x+1}$) na profundidade de 0–10 cm de acordo com a aplicação de doses de fosfato natural reativo e doses de enxofre. $\hat{y} = 1,52359 - 0,0020035^{*} P - 0,0197619^{**} S + 0,00017994^{*} S^2 + 0,0000461821^{*} PS$ ($R^2 = 0,65^{**}$), * , ** = coeficientes da equação significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

(FNR) reativo para produtividade da soja e massa de 100 grãos.

2. O FNR apresentou maior índice de eficiência agrônômica para produtividade da soja com aplicação de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ associada a 30 kg ha⁻¹ de S.

3. O teor foliar de P aumentou com as doses de SFT, mas não foi influenciado pela aplicação de FNR e S elementar.

4. O teor de S no tecido foliar aumentou com as doses de P e de S para ambas as fontes fosfatadas.

5. A aplicação de S-elementar proporcionou pequeno acréscimo no teor de S do solo para fonte FNR, na profundidade de 0–10 cm.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO, F.S.; SOUZA, R.B. & FONSECA, C.A. Métodos de análises de enxofre em solos e plantas. Viçosa, MG, Editora UFV, 2001. 131p.
- ARAÚJO, M.S.B. & SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região Nordeste. R. Bras. Ci. Solo, 21:643-650, 1997.

- BEDIN, I.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; FAQUIN, V.; TOKURA, A.M. & SANTOS, J.Z.L. Fertilizantes fosfatados e produção da soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:639-646, 2003.
- BOLAN, N.S.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W. & SCOTTER, D.R. Effect of liming and phosphate additions on sulphate leaching in soils. *J. Soil Sci.*, 39:493-504, 1988.
- CHIEN, S.H. & MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fert. Res.*, 41:227-234, 1995.
- EMBRAPA SOJA. Tecnologias de produção de soja – Paraná - 2004. Londrina, 2003. 281 p. (Sistemas de produção/Embrapa Soja, 3).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPSo). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção de Informação, 1999. 412p.
- FÉDÉRATION NATIONALE DE L'INDUSTRIE DES ENGRAIS - FNIE. La fertilization. Paris, 1974. 72p.
- FERREIRA, T.N. & KAMINSKI, J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais de Patos-de-Minas e Gafsa puros e modificados por acidulação e calcinação. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:158-162, 1979.
- HOROWITZ, N. & MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. *CI. Rural*, 33: 41-47, 2003.
- INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ – IAPAR. Cartas básicas do Estado do Paraná. Londrina, 1978. Não paginado
- KAMINSKI, J. & PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais em sistemas de cultivo. Santa Maria, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3)
- KHASAWNEH, F.E. & DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 30:159-206, 1978.
- KLIEMANN, H.J.; COSTA, A. V. & SILVA, F.C. Resposta à calagem e fosfatagem por três cultivos de soja em três solos no Estado de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD ROM.
- KORNDÖRFER, G.H. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais fornecerem fósforo para plantas de trigo. Porto Alegre, Fundação para o Desenvolvimento de Recursos Humanos. 1978. (Teses & Monografias)
- LENS, P.; TICHY, R. & POL, L.H. Sulfur cycle. In: LEDERBERG, J., ed. *Encyclopedia of microbiology*. 2. ed. San Diego, Academic, 2000. p.495-505..
- LÉON, L.A.; FENSTER, W.E. & HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:798-802, 1986.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato – POTAFOS, 1997. 319 p.
- MELO, W.J. & FERREIRA, M.E. Fatores do solo afetando a produtividade da cultura do arroz de sequeiro: Três fatores biológicos. In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA DO ARROZ DE SEQUEIRO, Jaboticabal, 1983. Anais. Jaboticabal, FCAV, 1983. p.99-136.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. & MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. *Pesq. Agropec. Brás.*, 37:1459-1466, 2002.
- NOGUEIRA, M.A. & MELO, W.J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. *R. Bras. Ci. Solo*, 27: 655-663, 2003.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J., Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- RAIJ, B. van Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Ceres/POTAFOS, 1991. 343 p.
- RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H. & SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. *Adv. Agron.*, 57:78-159, 1996.
- ROSOLEM, C.A. & MARCELLO, C.S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. *Sci. Agric.*, 55:448-455, 1998.
- SALE, P.W.G. & MOKWUNYE, A.U. Use of phosphate rocks in the tropics. *Fert. Res.*, 35:33-45, 1993.
- SFREDO, G.J.; BORKERT, C.M.; OLIVEIRA, M.C.N. ; WOBETO, C. & ALMEIDA, J. Determinação da relação ótima entre Ca, Mg e K para a cultura da soja em solos do Paraná: Estudo a campo. In: EMBRAPA SOJA. Resultados de pesquisa de soja 1991/92. Londrina, 1999. pt.1, p.327-355. (Embrapa Soja. Documentos, 138).
- SFREDO, G.J.; LANTMANN, A.F.; CAMPO, R.J. & BORKERT, C.M. Soja, nutrição mineral, adubação e calagem. Londrina, EMBRAPA-CNPSo, 1986. 51p. (EMBRAPA-CNPSo. Documentos, 64)
- STEFANUTTI, R.; MURAOKA, T. & MALAVOLTA, E. Comportamento de extratores em solo tratado com fontes diversas de fósforo. *Sci. Agric.*, 51:105-112, 1994.
- SYERS, J.J.; MACKAY, A.D.; BROWN, M.W. & CURRIE, L.D. Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. *J. Sci. Food Agric.*, 37:1057-1064, 1986.
- TEDESCO, M.J.; WOLKWEISS, S.J. & BOHNEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 188 p. (Boletim Técnico, 5)
- VITTI, G.C. & MALAVOLTA, E. Fosfogesso: Uso agrícola. In: MALAVOLTA, E., coord. SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS. Campinas, Fundação Cargill, 1985. p.161-201.