

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**

**Rodrigo Coqui da Silva**

**Piracicaba  
2012**



## **EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS TOTALMENTE ACIDULADOS COM SOLUBILIDADE VARIADA: Estudo de campo**

### **Resumo**

Fertilizantes fosfatados totalmente acidulados são as principais fontes de fósforo (P) utilizadas na agricultura brasileira. Dentre estes, o superfosfato simples (SFS) é o mais comercializado. A demanda por P é muito elevada principalmente nas regiões sob Cerrado, onde a soja é cultivada em extensas áreas cujo solo apresenta carência natural do nutriente. Como a legislação brasileira permitiu recentemente que fertilizantes menos solúveis fossem comercializados, objetivou-se avaliar a eficiência agronômica destes produtos em relação ao SFS, para a soja em condições de campo. Foi conduzido um experimento em Itiquira, Mato Grosso, em uma área com Latossolo Vermelho distrófico de textura muito argilosa e, portanto com alta capacidade de adsorção de P. Foram testados quatro fertilizantes similares ao superfosfato simples (SFS), porém com variações na proporção do P solúvel em água em relação ao P solúvel em citrato neutro de amônio + água (fi). Assim, a solubilidade variou de 50% até 85%, sendo a última referente ao SFS (padrão). O fertilizante de menor solubilidade (50%) proporcionou maior produtividade de soja quando comparado com o tratamento controle, porém esta produtividade foi inferior daquelas obtidas quando fontes mais solúveis foram aplicadas. Os fertilizantes com  $f_i > 60\%$  foram tão ou mais eficientes do que fonte padrão (SFS). Então, a solubilidade não causou prejuízo agronômico, desde que o fertilizante apresentasse  $f_i$  superior à 60%. Estes resultados confirmam tendências já observadas para muitos experimentos conduzidos em vasos (casa de vegetação). Poucos experimentos de campo haviam sido realizados sobre o assunto. Portanto, fertilizantes que contenham impurezas insolúveis podem ser alternativos ao uso do SFS, uma vez que a eficiência agronômica do fertilizante não está exclusivamente relacionada à sua solubilidade em água.

Palavras-chave: Fósforo; Superfosfato simples; Soja; Latossolo; Cerrado; Solubilidade.

### **Abstract**

Fully acidulated phosphate fertilizers are the main sources of phosphorus (P) in Brazilian agriculture. Among these, single superphosphate (SSP) is the most commercialized. The demand for P is very high especially in the regions under Cerrado, where soybean is grown in areas where the soil has extensive natural deficiency of this nutrient. Brazilian legislation recently allowed that less soluble fertilizers could be sold. So, the aim of this work was to evaluate the agronomic effectiveness of these new products as compared to SFS, for soybeans under field conditions. An experiment was carried out in Itiquira, State of Mato Grosso, Brazil, in an area with a clayey Rhodic Acrisol high in P adsorption capacity. Four fertilizers with the same compounds of single superphosphate (SSP), but varying in solubility were tested, according to the ratio of water soluble P presented in the citrate soluble P fraction ( $f_i$ ). Thus, the solubility ranged from 50% up to 85%, with SFS as the standard source. The lowest solubility fertilizer (50%) promoted higher soybeans yield as compared with the control treatment, but it was lower when compared with the yields obtained from those more soluble sources. Fertilizers with  $f_i > 60\%$  were as efficient as standard source (SSP). Then, there was not adverse effect of the solubility on its agronomic behavior, since the fertilizer presents  $f_i$  higher than 60%. These results confirmed trends already observed for many experiments conducted in pots (greenhouse). Few field experiments had been conducted on this subject. Therefore, fertilizers containing insoluble P impurities can be alternative to the

use of SFS, since the agronomic effectiveness of the fertilizer is not exclusively related to its water solubility.

Keywords: Phosphorus; Single superphosphate; Soybean; Oxisols; Cerrado; Solubility.

## 5.1 Introdução

A baixa concentração natural de P solos agricultáveis é um dos principais limitantes para atingir o potencial produtivo das culturas (HINSINGER, 2001). Além disso, quando adicionado ao solo via fertilizantes, o nutriente sofre uma série de processos e reações com os colóides do solo que invariavelmente levam a diminuição de sua disponibilidade as plantas.

O principal processo que leva à baixa eficiência da adubação fosfatada é a transformação do P lábil para P não-lábil (*“fixação do P”*), que por sua vez é o resultado dos processos de adsorção específica e da formação de compostos de baixa solubilidade, em especial, P-Fe e P-Al (LARSEN, 1967). Este é um típico cenário nas regiões dos trópicos úmidos, principalmente nos solos sob cerrado, pelo elevado poder de adsorção específica devido à predominância de oxi-hidróxidos de Fe e Al, os quais, com a caulinita, perfazem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, sendo a mais ativa e na qual ocorrem as reações (ARAI; SPARKS, 2007). Importante mencionar também que o elemento possui elevada afinidade com outros metais, formando os fosfatos divalentes e trivalentes de baixíssima solubilidade (PIERZYNSKI; LOGAN; TRAINA, 1990).

Coincidentemente, é justamente na região sob cerrado que a agricultura brasileira expressa seu maior potencial com extensas áreas sendo cultivadas principalmente com soja, algodão e milho. Por sua importância no agronegócio em área e distribuição geográfica, a soja ocupa posição de destaque entre as culturas. Entre os principais produtores mundiais de soja, o Brasil é o que possui a maior área cultivada sob condições tropicais e subtropicais, com mais de 20 milhões de hectares sendo cultivados em ampla distribuição geográfica, desde o Rio Grande do Sul até o Roraima, já no hemisfério norte (OLIVEIRA Jr. et al., 2010).

Mesmo sendo um dos nutrientes menos exigidos pela cultura da soja, o P é o que mais limita a produção desta e da maioria das outras culturas no Brasil central. Ainda assim, respostas significativas são obtidas mesmo com doses de até 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SOUSA; LOBATO; REIN, 2002), em função do elevado poder fixação de P dos solos de cerrado (LEAL; VELLOSO, 1973).

As principais fontes de P para a soja são os fosfatos totalmente acidulados e dentre estes o destaca-se o superfosfato simples (SFS) cujo volume comercializado no Brasil é maior

do que a soma dos demais fertilizantes acidulados (ANDA, 2011). Normalmente estes fertilizantes apresentam elevada eficiência agronômica uma vez que são altamente solúveis. Porém, mesmo os fosfatos totalmente acidulados produzidos a partir de rochas fosfáticas com elevado grau de impurezas, podem apresentar eficiência agronômica, em condições de campo, semelhante àqueles fertilizantes que não contém compostos fosfáticos insolúveis (PROCHNOW; CUNHA; VENTIMIGLIA, 2001). Trata-se na verdade, da constatação de um comportamento já observado anteriormente, porém em condições de vaso em casa de vegetação (SIKORA; DILLARD; COPELAND, 1989; BARTOS et al. 1991, 1992), onde as raízes são confinadas em um volume de solo reduzido, apresentam assim maior contato com o fertilizante adicionado (ambiente rizosférico).

Seguindo tendências internacionais, o governo Brasileiro permitiu recentemente a inclusão de novos produtos na legislação de fertilizantes. Este fato já havia ocorrido em outros países, com a redução da exigência de solubilidade de fertilizantes fosfatados. Mas no Brasil ocorreu a criação de uma nova categoria para permitir a inserção de fertilizantes menos concentrados e solúveis (BRASIL, 2008). Fosfato acidulado sulfúrico (FAS) e fosfato acidulado fosfórico (FAF) são os novos fertilizantes cuja obtenção é similar ao SFS e ao superfosfato triplo (SFT), respectivamente, porém os últimos apresentam maiores teores de  $P_2O_5$  bem como a fração deste que é solúvel em água. Assim, faltam estudos em condições de campo para avaliar esta nova categoria de fertilizantes e compará-la com os tradicionais SFS e SFT.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados acidulados, tendo SFS como fonte padrão, comparando-o com outros três fertilizantes, sendo que dois deles atendem aos critérios para a nova categoria criada (FAS), e um fertilizante cuja solubilidade o impede de ser classificado como tal.

## **5.2 Material e métodos**

### **Descrição do meio físico**

O experimento foi realizado na estação experimental da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso - Fundação MT, localizada na Fazenda Santa Maria (figura 5.2), no município de Itiquira, Mato Grosso ( $17^{\circ} 09' S$  e  $54^{\circ} 42' W$ , 490 m de altitude), região sob bioma de Cerrado, cujo clima predominante, segundo classificação de Köppen, é o do tipo Aw.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 estão os resultados da caracterização química e física do solo, que foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico – LVd. As determinações químicas foram realizadas seguindo os procedimentos descritos por Raij et al. (2001) e as determinações físicas de acordo com os procedimentos descritos por Bouyoucos, (1962). O solo apresenta textura muito argilosa ( $716 \text{ g kg}^{-1}$ ), com teor de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  de P disponível (resina) e capacidade máxima de adsorção de P (isoterma de Langmuir) de  $1315,78 \mu\text{g g}^{-1}$  (figura 5.1) este último resultado obtido após a realização de uma curva de adsorção de P, seguindo os procedimentos descritos por Graetz e Nair (2000).

Tabela 5.1 - Análise química do solo da Fazenda Santa Maria, Itiquira, MT

pH	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	$\text{mg dm}^{-3}$					$\text{mmolc dm}^{-3}$				%			$\text{mg dm}^{-3}$			
4,9	10	4	0,4	27	18	1	52	45,6	97,8	47	1	0,16	0,4	50	2,3	0,3

Tabela 5.2 - Análise física do solo da Fazenda Santa Maria, Itiquira, MT

Classe de textura	Areias <sup>1</sup>						Silte <sup>2</sup>	Argilas <sup>3</sup>		Floculação
	MG	G	M	F	MF	AT		Disp.	H <sub>2</sub> O	
	$\text{g kg}^{-1}$									%
Muito argilosa	6	12	97	116	16	246	37	716	128	82

<sup>1</sup> Frações de areia: muito grossa (MG) = 2 a 1; grossa (G) = 1 a 0,5; média (M) = 0,5 a 0,25; fina (F) = 0,25 a 0,10; muito fina (MF) = 0,10 a 0,05; areia total (AT) = 2 a 0,05; (em mm).

<sup>2</sup> Silte = 0,05 a 0,002; (em mm).

<sup>3</sup> Argila total < 0,002; (em mm). Disp. – com dispersante; H<sub>2</sub>O – com água

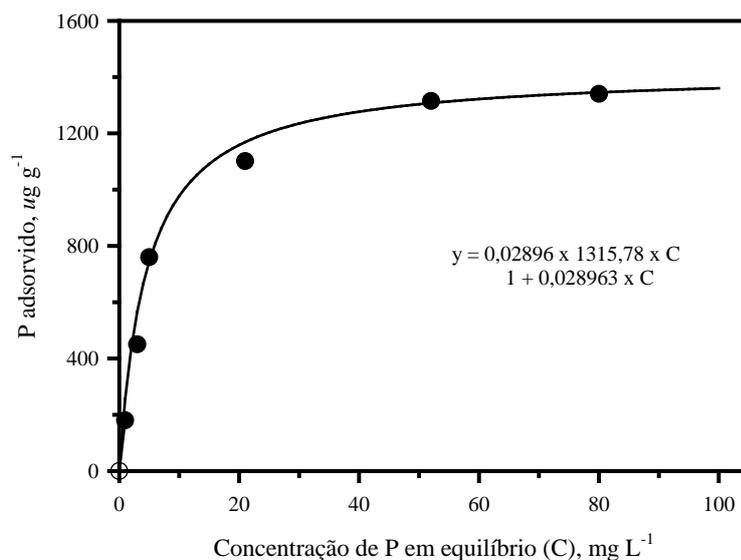


Figura 5.1 – Representação gráfica da capacidade máxima de adsorção do solo, por meio do ajuste da curva de adsorção à equação da isoterma de Langmuir

O solo da estação experimental Santa Maria esteve sob cultivo de pastagem com *Brachiaria decumbens* (L.), em exploração pecuária nos últimos 18 anos. No outono de 2008, o solo foi subsolado na profundidade de 30 cm e recebeu a aplicação de calcário, na dose de  $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , mediante incorporação com grade aradora de 32", na profundidade de 20 cm. Nas safras 2009/2010 e 2010/2011, a área foi cultivada com milho/braquiária, quando então o experimento foi instalado.

O experimento com soja foi instalado em novembro de 2011 e será conduzido por três safras (2011/12 – concluído; 2012/13 – em curso; 2013/14), sempre utilizando o cultivar TMG 132 RR, por ser um dos materiais genéticos mais cultivados na região e por apresentar um bom potencial produtivo. A área total das parcelas experimentais é de  $40,5 \text{ m}^2$ , (8,1 m x 5 m) cultivando-se 8 linhas de soja espaçadas de 0,45 m (figura 5.3). Nas safras 2012/13 e 2013/14 haverá subdivisão das parcelas experimentais para comparações pertinentes referentes ao efeito residual das fontes de P, porém no presente trabalho apenas os resultados da safra 2011/12 são apresentados.



Figura 5.2 Vista aérea da estação experimental da Fundação MT

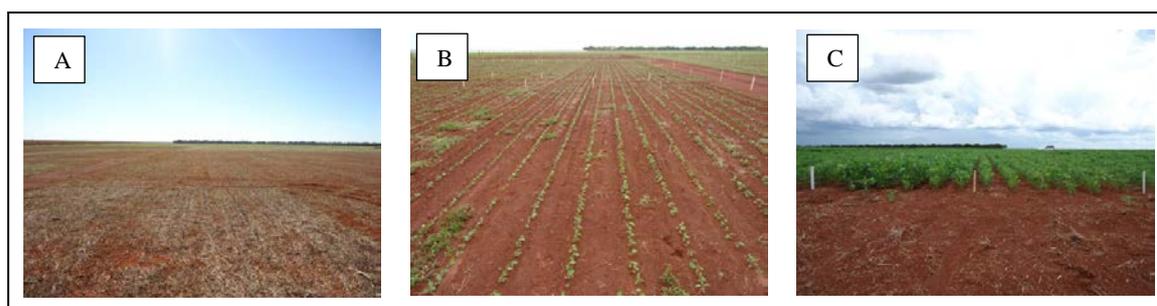


Figura 5.3 – Visão da área experimental antes [A] e durante o experimento [B] e [C]

## Fertilizantes testados

Foram testados quatro fertilizantes fosfatados totalmente acidulados, sendo eles: (i) SFS-85, superfosfato simples; (ii) FAS-70, fosfato acidulado sulfúrico; (iii) FAS-60, fosfato acidulado sulfúrico e; (iv) FSR-50, fosfato de solubilidade reduzida<sup>1</sup>. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água. Estes eram os valores desejados inicialmente, porém em alguns casos foram ligeiramente superiores. Este valor percentual é comumente descrito na literatura como valor ou índice “Fi”.

O superfosfato simples (SFS-85) e o fosfato acidulado sulfúrico (FAS-60) correspondem a produtos comerciais, obtidos a partir de rochas fosfáticas de Catalão/GO e Lagamar/BA, respectivamente, cuja caracterização é apresentada na tabela 5.3. Já o fosfato acidulado sulfúrico (FAS-70) e o fosfato de solubilidade reduzida (FSR-50) são produtos não comerciais produzidos exclusivamente para o presente experimento, a partir do FAS-60.

Objetivou-se provocar alterações na fração de P insolúvel em água, porém solúvel em citrato neutro de amônio + água, com valores de fi de 85%, 70%, 60% e 50%, sendo todos com o mesmo processo de produção e/ou obtenção (ataque sulfúrico).

Tabela 5.3 - Caracterização dos fertilizantes

Fertilizante	Procedência	Conversão <sup>12</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>13</sup>	Fi <sup>14</sup>
			Total	CNA+H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O		
SFS-85 <sup>11</sup>	Catalão/GO	98,76	20,97	20,71	18,04	1,36	87,11
FAS-60 <sup>11</sup>	Lagamar/BA	97,72	17,11	16,72	10,23	2,77	61,18

<sup>11</sup> SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico;

<sup>12</sup> Conversão: quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total convertida para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em CNA+H<sub>2</sub>O (valor comercial), sendo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (CNA+H<sub>2</sub>O) / P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Total) x 100;

<sup>13</sup> Inclui Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

<sup>14</sup> Fi: Percentual da fração do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água.

Fosfato monocalcico (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> / PM 234,05 - p.a.) foi adicionado para aumentar a fração de P solúvel em água do FAS. Por analogia, óxido de ferro<sup>12</sup> foi utilizado para reduzir

<sup>11</sup> Esta denominação foi atribuída em função das características desejadas e, portanto, não se trata de um nome ou marca comercial. A opção por não denominar este fertilizante como FAS-50, seguindo a lógica da nomenclatura empregada para FAS-70, se deve ao fato que com valor de fi de 50%, este produto não pode ser considerado um FAS, de acordo com a legislação brasileira. Da mesma forma que um fertilizante produzido pela rota sulfúrica, apresentando um valor de fi inferior à 85%, pode ser comercializado, mas não pode ser denominado SFS, mesmo que sua produção tenha sido exatamente igual à obtenção do SFS.

<sup>12</sup> Produto comercial - óxido de ferro sintético (amorfo).

a fração de P solúvel em água, por meio da formação de produtos de baixa solubilidade do tipo P-Fe, sendo esta uma das principais impurezas catiônicas da fração insolúvel de P em fertilizantes fosfatados acidulados produzidos a partir de rochas fosfáticas brasileiras (PROCHNOW et al., 2003). As quantidades exatas de fosfato monocálcico e óxido de ferro adicionados ao FAS-60 para provocar as modificações desejadas foram obtidas a partir de uma completa curva de resposta.

Sabendo-se a proporção de fosfato monocálcico e de óxido de ferro a ser utilizada na mistura com o FAS-60 para se obter, respectivamente, o FAS-70 e o FSR-50, a etapa seguinte foi a granulação destes produtos. Tal procedimento foi realizado na empresa GranTec – Tecnologia de Materiais Ltda., no município de Piracicaba, SP (figura 5.4). O objetivo do teste realizado foi obter informações exatas referentes à quantidade de água e à necessidade ou não de agentes aglutinantes para se obter a granulação destes produtos.

A primeira etapa para a obtenção do FAS-70 e do FSR-50 foi a moagem fina do FAS-60. Após, foi feita a mistura da matriz (FAS-60) com o aditivo (fosfato monocálcico ou óxido de ferro) em um granulador de bancada do tipo tambor-rotativo. Depois de cerca de dois minutos de agitação (velocidade do eixo 200 rpm e velocidade do agitador = 3000 rpm), água foi lentamente adicionada ao material que era agitado até que uma massa granulada fosse lentamente sendo obtida. O teste foi repetido para adição de um agente aglutinante (amido de milho foi utilizado), já estabelecida à quantidade de água a ser adicionada. Após o final destes testes, a massa granulada era descarregada do granulador, seca a 45° C e finalmente peneirada para seleção dos grânulos com diâmetro de aproximadamente 2 mm.

Devido à grande quantidade necessária, a granulação dos fertilizantes para a realização dos três ciclos do experimento de campo foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Fertilizantes da Embrapa Solos<sup>13</sup>, na unidade de Rio Verde, GO (figura 5.5). Os procedimentos seguiram os critérios técnicos estabelecidos pelo teste preliminar realizado na empresa GranTec, porém com o uso de um prato granulador (ou granulador tipo disco). Vale ressaltar que o FAS-60 também precisou ser granulado uma vez que o mesmo foi adquirido na forma de pó.

---

<sup>13</sup> Estrutura gentilmente cedida pelo Dr. Vinícius de Melo Benites, pesquisador científico da Embrapa Solos e responsável técnico do Laboratório.



Figura 5.4 - Procedimentos de granulação (GranTec Ltda - Piracicaba, SP).



Figura 5.5 - Procedimentos de granulação (Embrapa Solos - Unidade de Rio Verde, GO)

Os tratamentos do experimento estão descritos na tabela 5.4. A dose aplicada foi de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (CNA+H<sub>2</sub>O), sendo definida pela equipe técnica do Programa de Monitoramento de Adubação – PMA da Fundação MT, levando-se em consideração o tipo de solo do local e fatores de ordem prática, como a experiência da equipe com experimentos da mesma natureza.

Tabela 5.4 - Descrição dos tratamentos para as três safras de soja

Tratamentos	Subdivisão	Ano <sup>1</sup>		
		2011 / 2012	2012 / 2013	2013 / 2014
		Fertilizantes <sup>2</sup>		
1	1	-	-	-
2	2.1	SFS-85	-	-
	2.2	SFS-85	SFS-85	-
	2.3	SFS-85	SFS-85	SFS-85
3	3.1	FAS-70	-	-
	3.2	FAS-70	FAS-70	-
	3.3	FAS-70	FAS-70	FAS-70
4	4.1	FAS-60	-	-
	4.2	FAS-60	FAS-60	-
	4.3	FAS-60	FAS-60	FAS-60
5	5.1	FSR-50	-	-
	5.2	FSR-50	FSR-50	-
	5.3	FSR-50	FSR-50	FSR-50
6	6.1	FSR-50	-	-
	6.2	-	FSR-50	-
	6.3	-	-	FSR-50
7	7.1	FAS-60	-	-
	7.2	-	FAS-60	-
	7.3	-	-	FAS-60
8	8.1	FAS-70	-	-
	8.2	-	FAS-70	-
	8.3	-	-	FAS-70
9	9.1	SFS-85	-	-
	9.2	-	SFS-85	-
	9.3	-	-	SFS-85

<sup>1</sup> Somente os resultados da safra 2011/12 serão apresentados no presente trabalho, ou seja, os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5;

<sup>2</sup> SFS: Superfosfato simples; FAS: Fosfato acidulado sulfúrico; FSR: Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água. Este valor percentual é comumente descrito como “índice Fi”.

## Condução do experimento e parâmetros avaliados

Antes da semeadura, foi realizado o tratamento de sementes com inoculante, cobalto, molibdênio, inseticida e fungicida, conforme dose recomendada para a cultura. Os demais nutrientes foram aplicados nas doses de 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, 2 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, 5 kg ha<sup>-1</sup> de Mn, e 0,5 kg ha<sup>-1</sup> de B e Cu. Além disso, quando necessário, os procedimentos de controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizados utilizando também produtos apropriados e oficialmente recomendados por Embrapa (2003).

A semeadura ocorreu no dia 01 de novembro de 2011 e a colheita no dia 26 de março de 2012 (147 dias). O regime pluviométrico durante a condução do experimento foi adequado para o desenvolvimento das plantas, sendo que o valor acumulado foi de 1101 mm (figura 5.6-A). Apesar disso, a distribuição não foi uniforme justamente quando da semeadura do experimento, com um período de estiagem que comprometeu o desenvolvimento inicial das plantas. A estação meteorológica que coleta os dados fica 4,3 km distante do experimento.

Foram avaliados os seguintes parâmetros: (i) análise foliar: 20 trifólios (pecíolo + folíolo) por parcela foram coletados no período da floração plena (estádio R2) para a análise; (ii) estande final: o número de plantas foi contado em três metros em dois pontos da parcela; (iii) altura final das plantas: a altura final foi medida em plantas no estágio R9 (ponto de colheita), em 10 plantas representativas por parcela; (iv) massa de mil grãos: a massa de cinco amostras de 100 grãos por parcela foi determinada. Posteriormente, as médias obtidas foram extrapoladas para peso de mil grãos e corrigidas para 13% de umidade; (v) produtividade: foram coletadas amostras de produtividade em dois pontos representativos por parcela com duas linhas adjacentes de 2,0 m de comprimento. A produtividade também foi padronizada para 13% de umidade; (vi) análise do P disponível no solo: foram coletadas amostras de solo após a colheita do experimento, na profundidade de 0-0,2 m. Foram coletadas 10 sub amostras, com dois pontos de amostragem em cada parcela - cinco sub amostras em cada ponto (uma amostra na linha de semeadura, duas amostras exatamente no centro da entrelinha e outras duas na região entre a entrelinha e a linha de semeadura meio).

As amostras de tecido vegetal foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por quatro dias, pesadas e moídas para posterior digestão nítrica perclórica, para determinação do P total por meio do método colorimétrico do metavanadato (MALAVOLTA, VITTI; OLIVEIRA, 1997). As amostras de solo foram secas ao ar (TFSA < 2 mm) para a determinação do teor de P disponível pelos métodos da resina trocadora de íons (RAIJ; QUAGGIO, 2001) e Mehlich-1 (EMBRAPA, 1999).

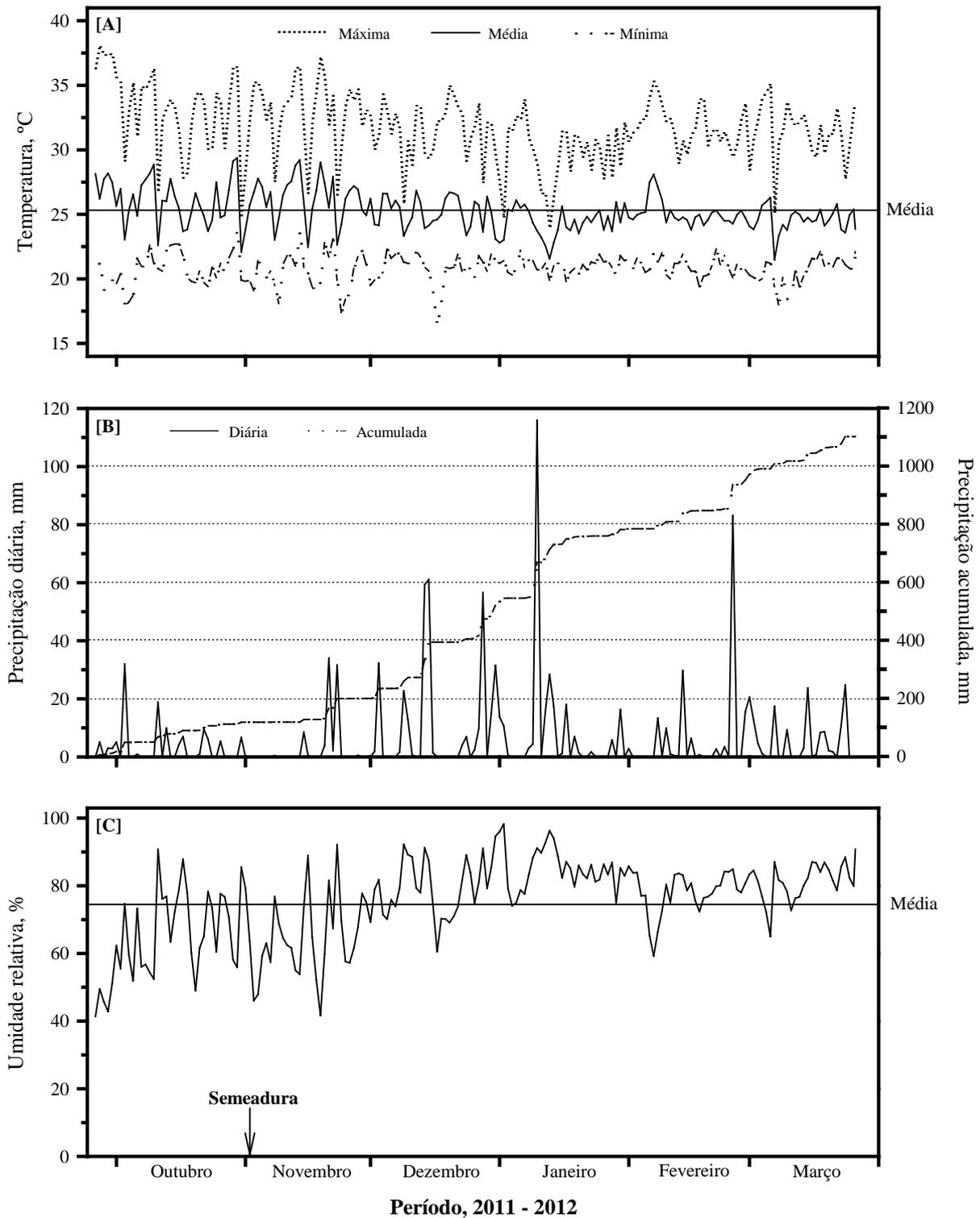


Figura 5.6 - Dados de temperatura (máxima, média e mínima, °C) [A], precipitação (diária e acumulada, mm) [B] e umidade relativa (%) [C] durante o ciclo da soja na estação experimental da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso - Fundação MT, localizada na Fazenda Santa Maria, no município de Itiquira, Mato Grosso (17° 09' S e 54° 42' W, 490 m de altitude).

## Análise dos dados

O experimento foi realizado com delineamento em blocos completos ao acaso, com quatro repetições, sendo composto por 5 tratamentos: (i) SFS-85, (ii) FAS-70, (iii) FAS-60, (iv) FSR-50 e (v) tratamento controle (sem P). A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o pacote estatístico SAS<sup>®</sup> - “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 1996) e o SigmaPlot<sup>®</sup> versão 11 (SYSTAT SOFTWARE Inc, 2006), para a análise de variância, teste de médias e correlações. A eficiência agrônômica relativa (EAR) das fontes foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$EAR (\%) = \frac{Y_{Fertilizante\ i} - Y_{Controle}}{Y_{Fertilizante\ Padrão} - Y_{Controle}} \times 100$$

em que:

$Y_{Fertilizante\ i}$  : é a resposta obtida com a aplicação de um fertilizante  $i$  testado;

$Y_{Fertilizante\ Padrão}$  : é a resposta obtida com a aplicação d fertilizante padrão (SFS-85)

$Y_{Controle}$  : é a resposta obtida sem a aplicação de P (tratamento controle)

## 5.3 Resultados e discussão

O número de plantas por hectare (estande) não foi influenciado pelos tratamentos (figura 5.7-A). Desde que não exista nenhuma deficiência nutricional extrema no solo, este parâmetro está relacionado muito mais ao poder de germinação/vigor das sementes e seu desenvolvimento inicial do que propriamente à adição de algum insumo, como fertilizante.

A altura das plantas foi superior, 10 cm em média, nos tratamentos com FAS-60, FAS-70 e SFS-85 do que FSR-50 e controle (figura 5.7-B). Existe correlação positiva entre o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea e este pode ser um dos motivos para este resultado, uma vez que há maior desenvolvimento das plantas em solos bem supridos de P (BOLAN, 1991; FARDEAU, 1996). Quando alguns nutrientes limitam o crescimento vegetal, notadamente o P, as raízes se transformam em forte dreno de carboidratos, causando maior limitação no crescimento da parte aérea (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998). Esta redução no crescimento da parte aérea ocorre assim que a deficiência de P se manifesta no solo. Como os fertilizantes elevaram o teor de P no solo, como será visto a seguir, isto

provavelmente promoveu melhor desenvolvimento radicular e conseqüentemente maior desenvolvimento da parte aérea.

A massa de 1000 grãos não foi influenciada pela solubilidade das fontes, sendo a única diferença observada apenas entre o controle e todos os demais tratamentos (figura 5.7-C). Esta diferença só foi estatisticamente detectada em função do baixo coeficiente de variação apresentado para variável (CV 3,8%), demonstrando que é um parâmetro pouco influenciado por fatores do solo, entre eles o suprimento de P.

Em condições de baixo suprimento de nutrientes no solo, a planta utiliza de mecanismos para a produção de uma quantidade menor de grãos, em detrimento à produção de uma grande quantidade de grãos com baixo peso e/ou malformados. Assim, a planta produz normalmente número reduzido de grãos quando ocorrem deficiências nutricionais, porém mantendo praticamente o mesmo peso daqueles grãos produzidos com pleno suprimento do nutriente em questão, neste caso o P (O'TOOLE; BLAND, 1987). Esta explicação é suportada pelos dados referentes à produtividade da soja, apresentados nas figuras 5.9 e 5.10, uma vez que a obtenção de produtividade superior só pode ser decorrente do maior número de grãos (e vagens) produzidos, uma vez que estes apresentam sempre o mesmo peso.

A concentração de P nas folhas da soja apresentou valores abaixo do que preconizado por Mascarenhas e Tanaka (1996) cujo limite mínimo é de  $2,5 \text{ g kg}^{-1}$  de P, para o que estes autores consideram adequado para a cultura. Nenhum tratamento alcançou este valor, porém isto não foi um empecilho para o pleno desenvolvimento da soja. Lantmann e Castro (2003) também apresentam a mesma concentração crítica e mencionam ainda que abaixo de  $1,6 \text{ g kg}^{-1}$  de P o teor é considerado muito baixo. A concentração de P foi maior nos tratamentos com FAS-60, FAS-70 e SFS-85 do que o controle, enquanto que FSR-50 não diferiu nem do controle, nem das demais fontes de P.

As concentrações de P são classificadas como baixas, exceto para o controle cuja concentração foi baixa. No entanto, estes índices podem apresentar variações em função do solo, clima e material genético (LANTMANN; CASTRO, 2003), o que pode explicar o bom desenvolvimento das plantas (exceto o controle) mesmo com concentrações de P consideradas baixas no tecido vegetal. Outra hipótese para explicar o bom desenvolvimento das plantas é a forma de amostragem, sendo o folíolo amostrado juntamente com o pecíolo. Maeda, Lima Filho e Fabrício (2004) coletaram 46 amostras foliares de soja, com e sem o pecíolo, em 16 regiões consideradas com manejo nutricional adequado. Exceto para potássio, todos os outros macro e micronutrientes apresentaram menores concentrações no tecido vegetal quando foi

feita a amostragem com o pecíolo. Estes autores indicam que a interpretação das análises de tecido vegetal deve ser feita considerando o tipo de amostragem realizada.

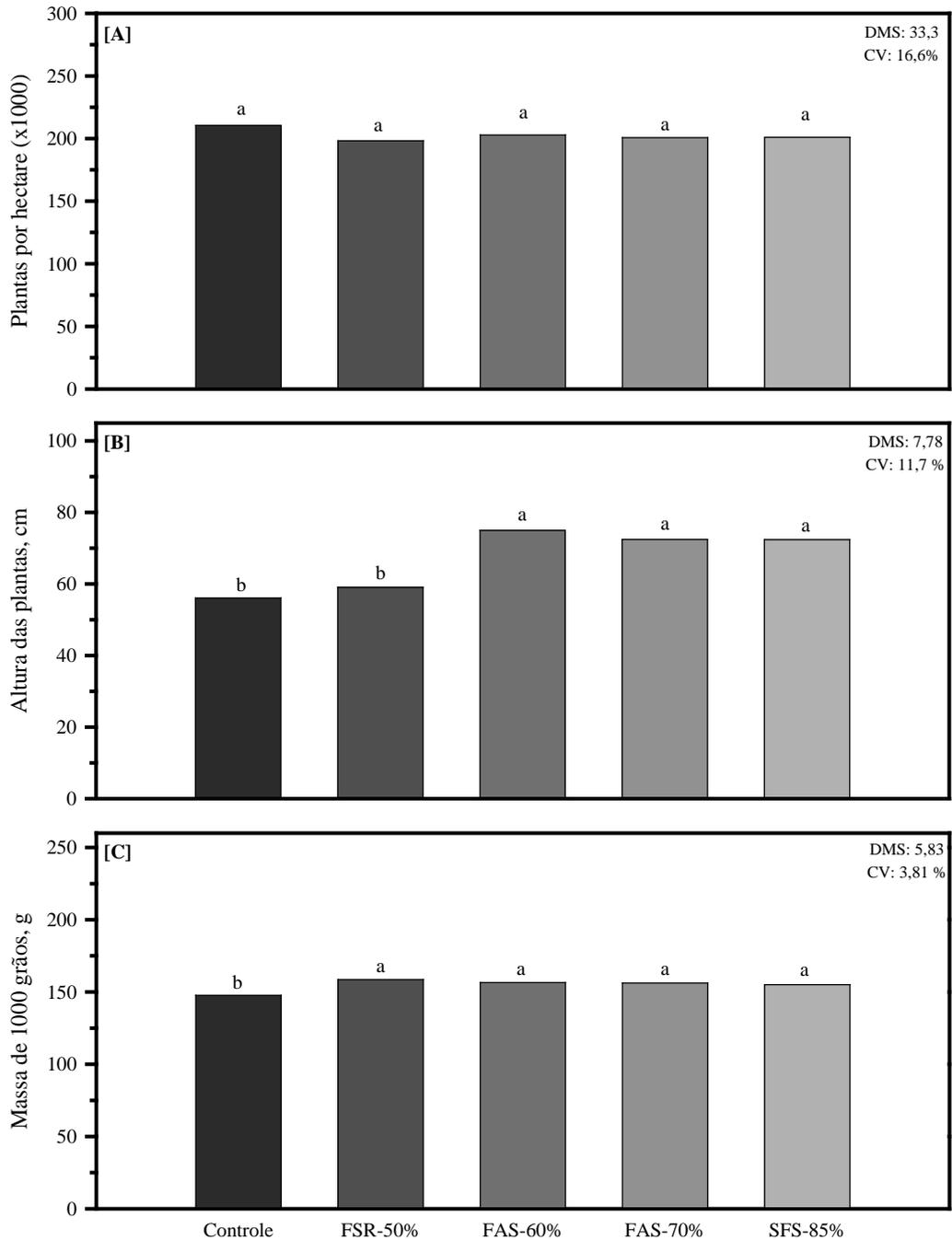


Figura 5.7 – Número de plantas por hectare [A], altura das plantas [B] e massa de 1000 grãos [C] de soja em função da aplicação de fertilizantes fosfatados. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

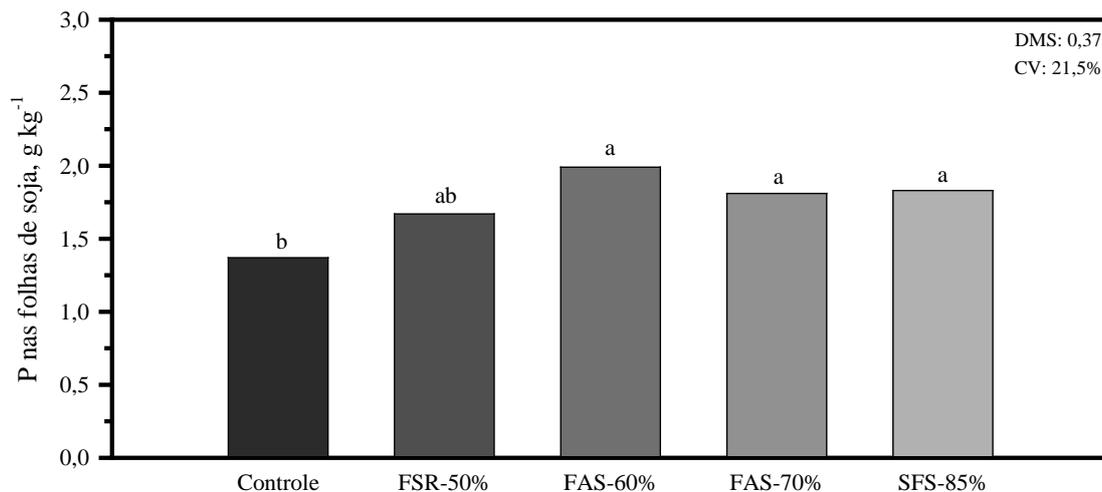


Figura 5.8 – Concentração de P nas folhas de soja em função da aplicação de fertilizantes fosfatados. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

A produtividade da soja seguiu a mesma tendência apresentada nas avaliações anteriores, com  $FAS-60 = SFS-85 = FAS-70 > FSR-50 > controle$  (figuras 5.9 e 5.10). Observa-se primeiramente, uma nítida resposta à aplicação de P, sendo produzidos  $1677 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $3219 \text{ kg ha}^{-1}$  de soja para os tratamentos controle e FAS-60, respectivamente. A grandeza da resposta à adubação fosfatada está relacionada, principalmente, à disponibilidade do nutriente no solo e à sua capacidade de adsorção, fatos que fazem com que o solo utilizado neste estudo apresente elevado potencial de resposta.

A partir de fi 60%, não foi observado nenhum benefício pelo aumento da solubilidade da fonte de P. Porém, a fonte com menor solubilidade (FSR-50) diferiu estatisticamente dos demais fertilizantes, fato também observado quando se comparou este fertilizante com o tratamento controle.

A eficiência agrônômica relativa (EAR) do FAS-60 foi a maior dentre as fontes (114%), mesmo esta fonte apresentando menor solubilidade do que a fonte utilizada como padrão, SFS-85, enquanto que a EAR do FSR foi de apenas 62%. Este resultado indica o potencial de uso de fertilizantes com menor teor de  $P_2O_5$  solúvel em água, e que até muito pouco tempo não era aceita pela legislação brasileira. Outro ponto positivo é o fato das indústrias de fertilizantes poderem utilizar materiais fosfáticas que outrora eram descartados em virtude da baixa pureza, e a consequente presença de compostos insolúveis no fertilizante

comercial. Uma vez que o processo de purificação dos concentrados apatíticos é caro, espera-se que estas fontes menos solúveis sejam alternativas menos custosas para os produtores, em virtude destes fertilizantes não demandarem de tantos processos para a eliminação de algumas destas impurezas.

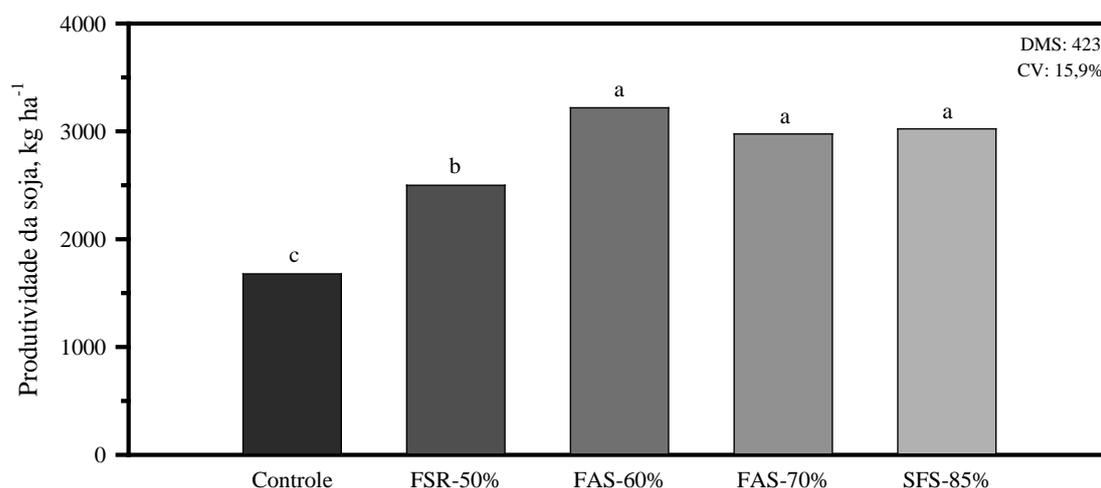


Figura 5.9 – Produtividade de grãos de soja em função da aplicação de fertilizantes fosfatados. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

Estes resultados confirmam a conclusão de vários outros trabalhos. Prochnow et al. (2003) observaram que um fertilizante com fi 46% foi tão eficiente agronomicamente quanto fosfato monocalcico (fi 100%). Mullins e Evans (1990) não observaram prejuízo agrônomico com o uso de MAP com fi variando de 81% até 100%. Lavres Jr et al. (2011) também não observaram diferenças significativas no desempenho agrônomicos de fontes cujo fi variava de 65% até 91%.

No entanto, a grande maioria dos trabalhos desta natureza foram desenvolvidos em vasos em casa de vegetação, onde a raiz pode explorar todo o volume de solo. É muito importante distinguir quando um experimento é realizado em campo e em casa de vegetação. Ambos apresentam benefícios inquestionáveis, porém a interpretação de um experimento de casa de vegetação não pode ser automaticamente extrapolada para situações de campo. Mesmo diferenças no volume dos vasos utilizados podem afetar os resultados, como

comprovou Mendes (2006) utilizando metodologia isotópica na avaliação do efeito de vasos de 0,5 a 18 L no desenvolvimento das culturas e respostas à P.

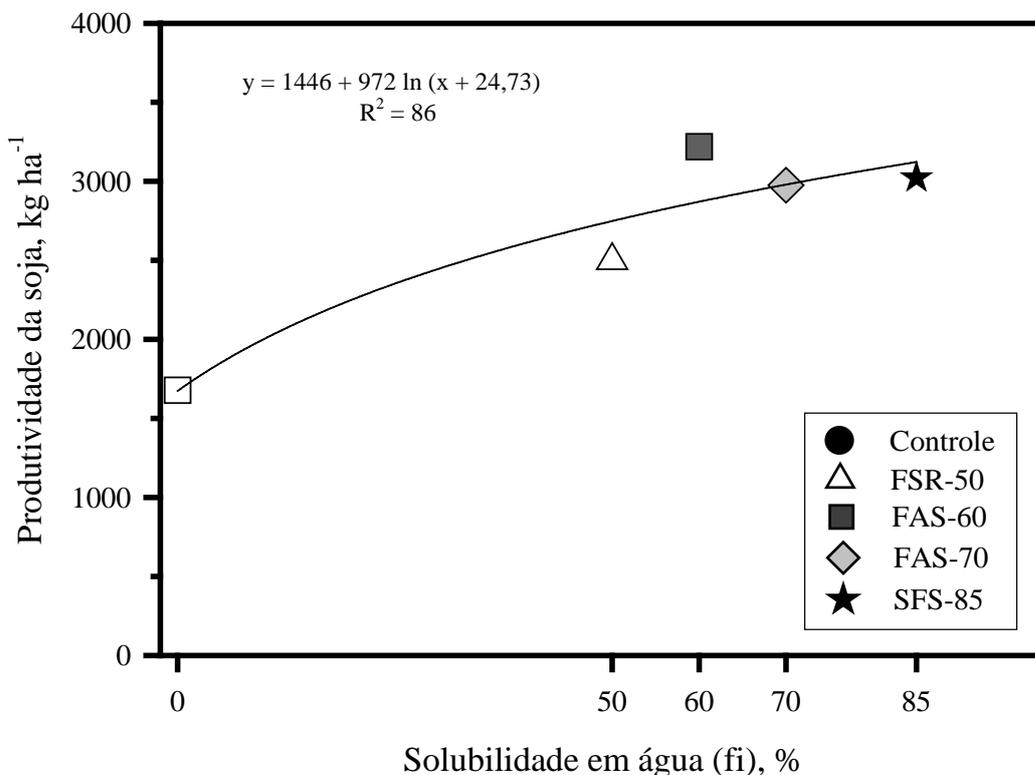


Figura 5.10 – Produtividade de grãos de soja em função da solubilidade em água (fi) de fertilizantes fosfatados. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

Dentre os poucos experimentos realizados em campo, Mullins e Evans (1990) e Mullins e Sikora (1990) também constataram não haver diferenças na eficiência agrônômica de fontes de P com fi de 81% a 95%. Prochnow, Cunha e Ventimiglia (2001) avaliaram 10 fertilizantes comerciais com solubilidade variada e utilizaram superfosfato triplo como fonte padrão. Neste estudo, a produção da soja não foi afetada pela fração insolúvel de P contido nestes fertilizantes.

Mesmo um fertilizante cuja composição não apresenta P solúvel em água, como é o caso do termofosfato, pode perfeitamente ser capaz de proporcionar bom desempenho agrônômico, sendo inclusive tão eficiente quanto uma fonte altamente solúvel como é o caso do SFT (NAKAYAMA et al., 1998). Outros resultados positivos obtidos com fontes menos solúveis são oriundos da mistura de fosfatos naturais reativos e fosfatos totalmente

acidulados. Oliveira Jr (2008) concluiu que a mistura entre SFT + fosfatos naturais reativos (no mesmo grânulo) proporcionou a mesma EAR daquela obtida com o uso do TSP sozinho, cultivando-se soja em condições de campo. Porém, a mistura no grânulo apresentava solubilidade relativa de apenas 60%, sendo uma boa alternativa para o suprimento da demanda inicial de P pela cultura e com um potencial efeito residual.

Os fertilizantes causaram o aumento nos teores de P no solo, que foi avaliado após a colheita da soja. Porém, devido ao elevado coeficiente de variação, não foi possível fazer claras distinções entre os tratamentos, mas sim apenas destes em relação ao controle. A maioria dos teores de P no solo ficou entre 5 e 10 mg kg<sup>-1</sup> de P, exceto para a fonte FSR-50, a qual apresentou as maiores variações entre os teores, prejudicando a correlação entre os métodos Mehlich e da resina, além da correlação destes com a produtividade da soja.

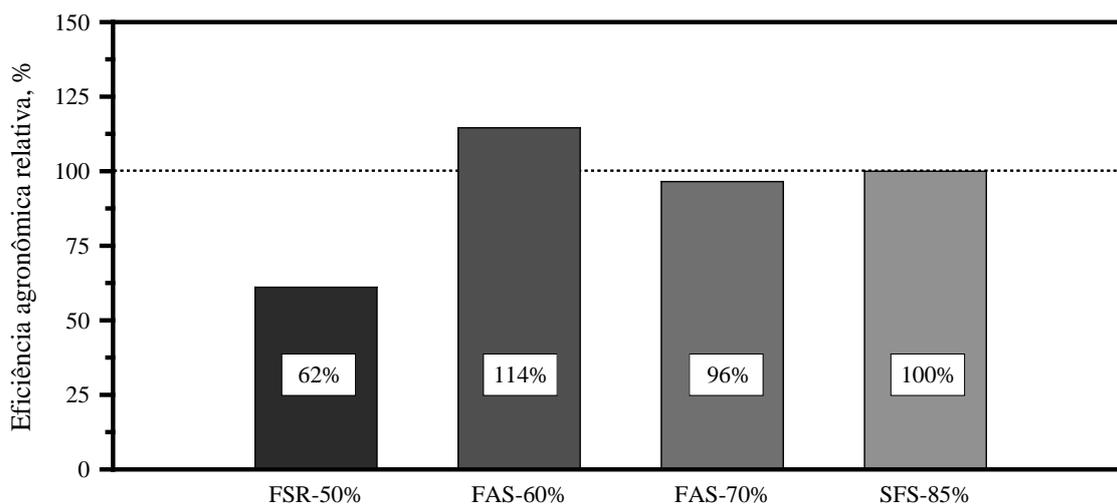


Figura 5.11 – Eficiência agrônômica relativa de fertilizantes fosfatados. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

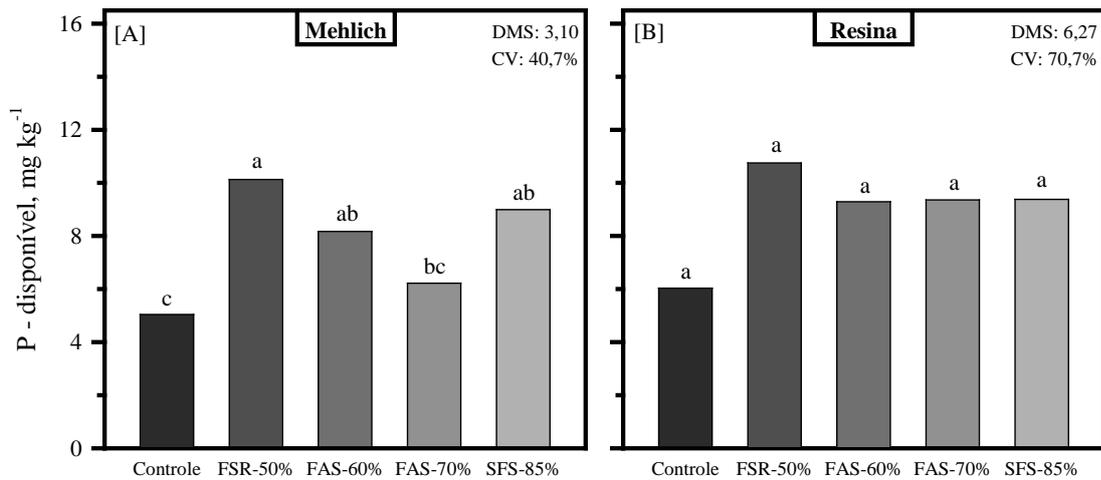


Figura 5.12 – Teor de P disponível no solo após o cultivo, em função da aplicação de fertilizantes fosfatados. Colunas seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio+água, que também é solúvel em água (Fi).

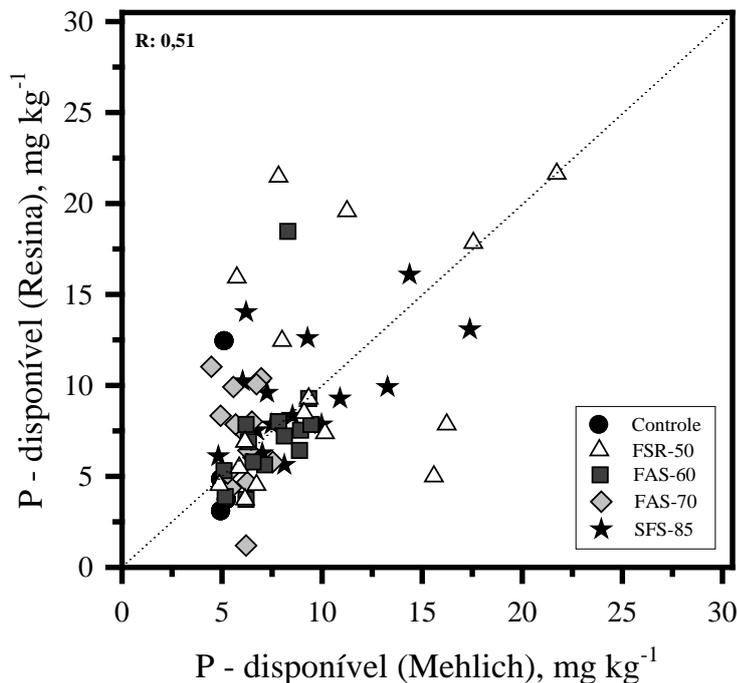


Figura 5.13 – Correlação entre os teores de P disponível no solo avaliados pelos métodos da resina e Mehlich, após o cultivo da soja. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio+água, que também é solúvel em água (Fi).

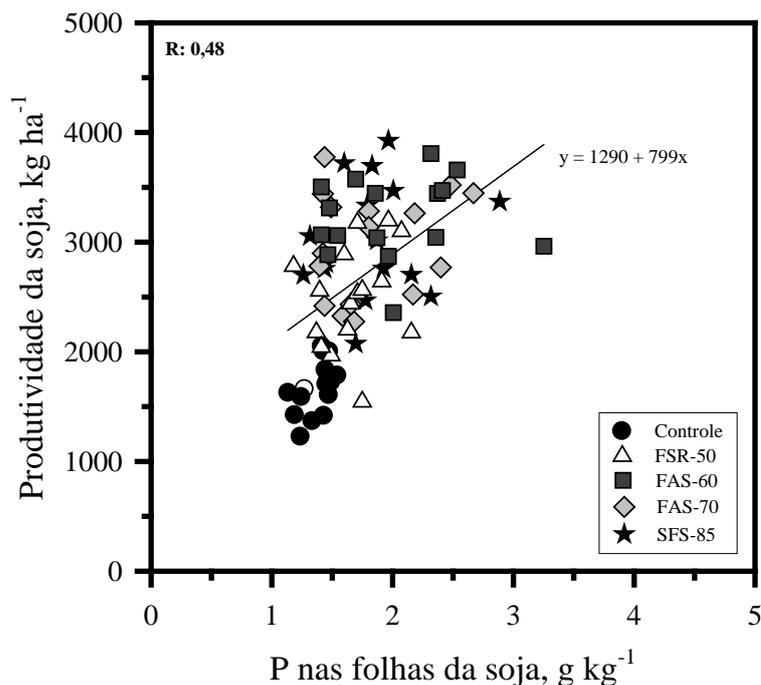


Figura 5.14 – Correlação entre o conteúdo de P nas folhas de soja e a produtividade de grãos de soja. SFS, Superfosfato simples; FAS, Fosfato acidulado sulfúrico; FSR, Fosfato de solubilidade reduzida. Os números à frente das siglas representam o valor percentual da fração do  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio + água, que também é solúvel em água (Fi).

Portanto, confirma-se que fertilizantes fosfatados que contenham impurezas insolúveis podem ser utilizados e que seu desempenho agrônômico não é influenciado pela presença destes compostos. No presente experimento, um fertilizante com fi 60% foi mais eficiente do que a fonte padrão, porém quando a solubilidade da fonte foi reduzida (FSR-50), a eficiência agrônômica também diminuiu.

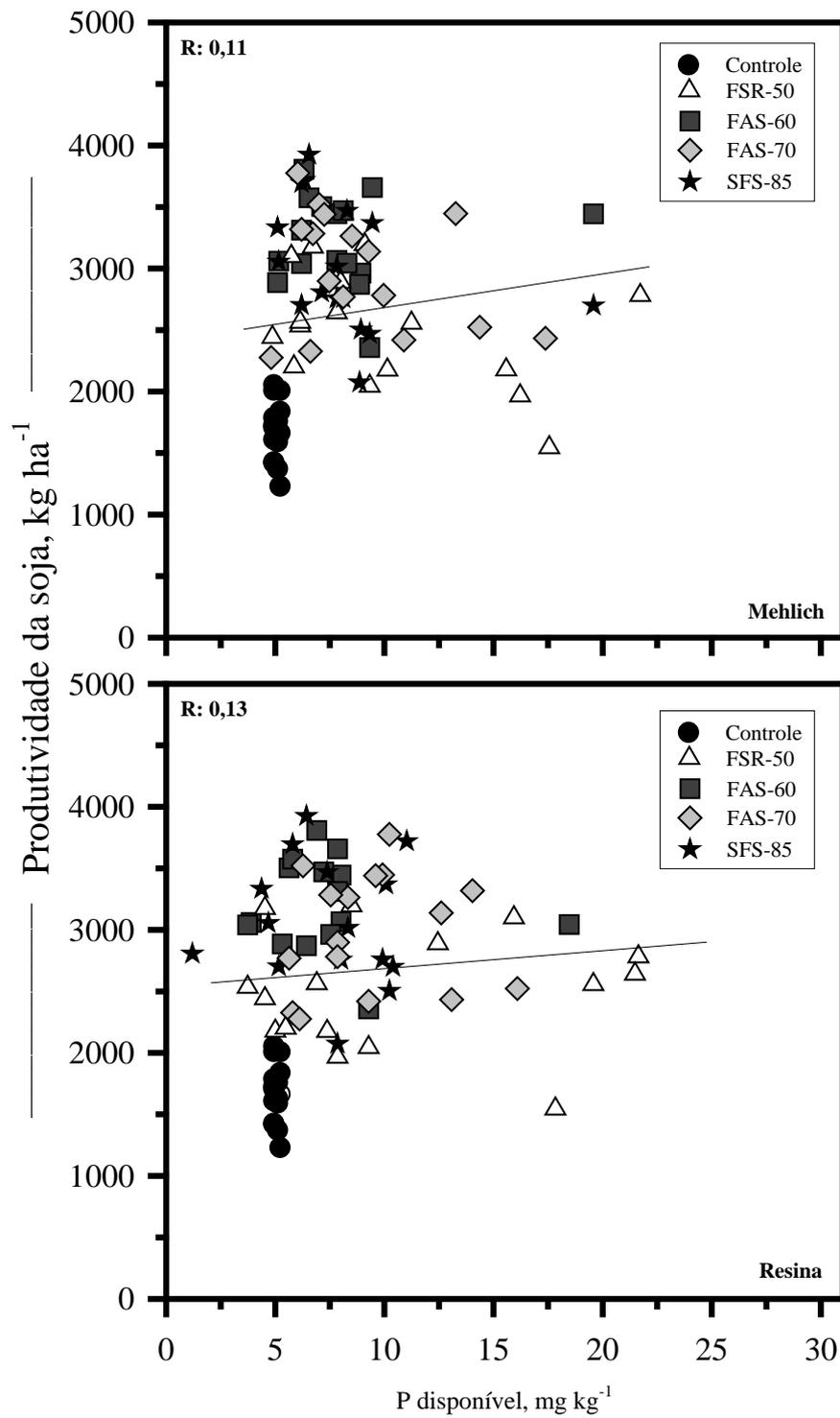


Figura 5.15 – Correlação entre os teores de P disponível no solo, avaliado pelos métodos da resina e Mehlich, e a produtividade da soja.

## 5.4 Conclusões

A solubilidade em água não afetou o desempenho agronômico dos fertilizantes cujo fi era maior do que 60%. FAS-60 e FAS-70 foram tão eficientes quanto a fonte padrão, SFS-85. Indica-se não haver necessidade que um fertilizante acidulado apresente solubilidade em água tão elevada (Ex. fi >90%) para apresentar desempenho agronômico satisfatório. Desta forma, a produção de fontes menos solúveis é uma boa alternativa para aquelas reservas fosfáticas que contenham certo grau de impurezas insolúveis.

## Referências

ANDA – Associação Nacional para difusão de adubos. **Anuário Estatístico ANDA**. São Paulo, 2011. 39p.

ARAI, Y.; SPARKS, D.L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: A multiscale approach. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 94, p. 135-179, 2007.

BARTOS, J.M.; MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J.; COPELAND, J.P. Availability of phosphorus in the water-insoluble fraction of monoammonium phosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n.2, p.539–543. 1991

BARTOS, J.M., MULLINS, G.L., WILLIAMS, J.C., SIKORA, F.J., COPELAND, J.P. Water-insoluble impurity effects on phosphorus availability in monammonium phosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 972–976, 1992.

BOLAN, N.S. A critical review of the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 143, p. 189-207, 1991.

BOUYOUCOS, G.J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 464–465, 1962.

BRASIL Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Legislação de Fertilizantes, corretivos, inoculantes, substratos e contaminantes**. Coordenação de fertilizantes, inoculantes e corretivos (CFIC). Brasília, 2008. 317 p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, 1999. 370p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil**, 2004. Londrina. Embrapa Soja: Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste; EPAMIG: Fundação Triângulo. 2003. 237 p. (Sistemas de Produção, 4).

- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região central do Brasil, 2009 – 2010.** Londrina. Embrapa Soja: Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste. 2008. 241 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 13).
- FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, , Dordrecht, v. 45, p. 91-100, 1996
- GRAETZ, D.A.; NAIR, V.D. Phosphorus sorption isotherm determination. In: PIERZYNSKI, G.M. (Ed.) **Methods of Phosphorus Analysis for soils, sediments, residuals and waters.** USDA-CSREES Regional Committee, 2000. p.35-38 (Southern cooperative series bull., 396).
- HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, p. 173-195, 2001.
- LANTMANN, A.F.; CASTRO, C. de. Resposta da soja à adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.) **Fósforo na Agricultura Brasileira.** Piracicaba, Potafós, 2004. p.223-239.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, n.19, p.151-210, 1967.
- LAVRES Jr., J.; REIS, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; CABRAL, C.P.; MALAVOLTA, E. Phosphorus uptake by upland rice from superphosphate fertilizers produced with sulfuric acid treatments of Brazilian phosphate rocks. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 42, p. 1390-1403, 2011.
- LEAL, J.R.; VELLOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em Latossolos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v.8, n. 1, p. 81-88, 1973. 1973
- MAEDA, S.; LIMA FILHO, O.F.de; FABRÍCIO, A.C. **Análise de amostras de folhas de soja: com ou sem pecíolo?** Comunicado Técnico 96. Embrapa: Dourados, 2004. 6 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas - Princípios e aplicações.** 2 ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p.
- MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T. Soja. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. P. 202-203 (Boletim Técnico, 100).
- MENDES, F.L. **Efeito do volume de terra no desenvolvimento das plantas de feijão e milho, na absorção de fósforo e no valor L (<sup>32</sup>P).** 2006. 106f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- MULLINS, G.L.; EVANS, C.E. Field evaluation of commercial triple superphosphate fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 25, n.1, p. 101–106, 1990.
- MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J. Field-evaluation of commercial monoammonium phosphate fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 22, n. 1, p. 1-6, 1990

NAKAYAMA, L.H.I.; CACERES, N. T.; ALCARDE, J. C.; MALAVOLTA, E. Eficiência relativa de fontes de fósforo de diferentes solubilidades na cultura do arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 183-190, 1998.

OLIVEIRA Jr, A. **Eficiência agrônômica de fosfatos de rocha, utilizados isoladamente ou associados ao superfosfato triplo, para a cultura da soja**. 2008. 123 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

OLIVEIRA Jr. A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F.A. Soja. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (Ed.) **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes**, Piracicaba. IPNI, v.3, p. 5-35, 2010.

O'TOOLE, J.C.; BLAND, W.L. Genotypic variation in crop plant root systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.41, p. 91-145, 1987

PIERZYNSKI, G.M.; LOGAN, T.J.; TRAINA, S.J. Phosphorus chemistry and mineralogy in excessively fertilized soils - solubility equilibria. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, n. 6, p.1589-1595, 1990.

PROCHNOW, L. I. ; CUNHA, J. ; VENTIMIGLIA, A. Field Evaluation of Water or Citrate Soluble Phosphorus in Modified Phosphate Rocks for Soybean. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n.1, p. 165-170, 2001.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; TAYLOR, R.W.; CARMONA, G.; HENAO, J.; DILLARD, E.F. Characterization and Agronomic Evaluation of Single Superphosphates Varying in Iron Phosphate Impurities. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n.2, p.293–302, 2003.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p.189-199.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. 4th ed. Cary, 1996.

SCHACHTMAN DP; REID RJ; AYLING SM, Phosphorus uptake by plants, from soil to cell. **Plant Physiology**, Dordrecht, v.116, p. 447-453, 1998

SIKORA, F.J.; DILLARD, E.J., COPELAND, E.J. Chemical characterization and bioavailability of phosphorus in water insoluble fractions of three monoammonium phosphate fertilizers. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**. v. 72, p852–856, 1989.

SOUSA, D.M.G. de.; LOBATO, E. (Ed.) **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2002. 416 p.

SYSTAT SOFTWARE Inc – SSI. **Sigmaplot for Windows, version 10**. 2006. Disponível em: <http://www.systat.com/products/sigmaplot/>. Acesso em: 13 mai. 2011.