

COMISSÃO VIII - FERTILIZANTES E CORRETIVOS

AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DO CONCENTRADO FOSFÁTICO DE PATOS DE MINAS TRATADO COM BISSULFATO DE AMÔNIO⁽¹⁾

T. A. REIN⁽²⁾, C. T. FEITOSA⁽³⁾, W. J. GOEDERT⁽²⁾, B. van RAIJ⁽³⁾,
D. M. G. de SOUSA⁽²⁾, P. C. W. de ALBUQUERQUE⁽⁴⁾ & F. G. M. COSTA⁽⁵⁾

RESUMO

Em ensaios em casa de vegetação em dois locais – Campinas, SP e Planaltina, DF – avaliou-se a eficiência agrônômica de 23 fontes de fósforo produzidas a partir do concentrado fosfático de Patos de Minas, que contém elevados teores de impurezas. Os fosfatos foram obtidos a partir do tratamento do concentrado fosfático com diferentes proporções de ácido sulfúrico (AS) e sulfato de amônio (SA), resultando na formação de bissulfato de amônio (BA), segundo a reação: $H_2SO_4 + (NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2NH_4HSO_4$. A relação molar SA/AS, que exprime a proporção final entre AS e BA, variou de 0,0 a 1,0. A taxa de acidulação, expressa pela relação molar H^+/P_2O_5 , variou de 1,0 a 4,1. Os fosfatos foram produzidos sob dois diferentes sistemas, no que se refere a variações na maneira de adição dos reagentes. Suas solubilidades em água e em ácido cítrico estiveram diretamente relacionadas à taxa de acidulação, refletindo diretamente sobre a eficiência agrônômica. As regressões entre eficiência agrônômica e solubilidade, a partir dos dados agrupados dos diferentes ensaios e locais, foram altamente significativas. Considerando-se uma mesma taxa de acidulação, os efeitos da adição do sulfato de amônio foram pequenos, embora resultando em aumento significativo na solubilidade cítrica dos fosfatos produzidos através de um dos sistemas. O efeito sobre a eficiência agrônômica também foi positivo apenas em um dos ensaios. Os resultados sugerem a necessidade de outros experimentos, visando melhor avaliar os efeitos sobre a eficiência agrônômica da adição do sulfato de amônio ao processo de solubilização de fosfatos.

Termos de indexação: Fósforo, fosfato-de-patos de minas, bissulfato de amônio, acidulação parcial, fosfato parcialmente solubilizado, eficiência agrônômica de fosfatos.

SUMMARY: AGRONOMIC EVALUATION OF "PATOS DE MINAS" ROCK PHOSPHATE TREATED WITH AMMONIUM BISULFATE

Twenty three sources of phosphorus, produced from a low quality rock phosphate (Patos de Minas), were evaluated in pot trials at two sites (Campinas, State of São Paulo, and Planaltina, Federal District). The rock phosphate was treated with sulfuric acid (SA) and ammonium sulfate (AS) in different ratios, leading to ammonium bisulfate (AB) formation according to the following reaction: $H_2SO_4 + (NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2NH_4HSO_4$. The molar ratio AS/SA, indicative of the proportion between SA and AB, varied from 0.0 to 1.0. The acidulation rate, given by H^+/P_2O_5 molar ratio, varied from 1.0 to 4.1. The phosphorus sources were produced by two systems related to different ways of adding the reactants. The water and citric acid solubilities of the sources were directly related to the acidulation rate, which reflected directly on their respective agronomic efficiencies. The regressions of agronomic efficiency on solubility, calculated with all the data of the trials at both sites, were highly significant. At a given acidulation rate, the effects of ammonium sulfate addition were small, although resulting in a significant increase of the citric acid solubility of the sources produced from one of the systems. Also, the effect upon the agronomic efficiency was positive at only one of the sites. These results suggest the need for further investigations in order to better evaluate the effects of ammonium sulfate addition on the solubilization process of phosphates.

Index terms: Phosphorus, "patos-de-minas" rock phosphate, ammonium bisulfate, partial acidulation, partially solubilized rock phosphate, agronomic efficiency of phosphates.

⁽¹⁾ Trabalho realizado dentro do convênio EMBRAPA/PETROFERTIL. Recebido para publicação em novembro de 1987 e aprovado em julho de 1988.

⁽²⁾ Pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, EMBRAPA, Caixa Postal 70.0023, CEP 73300 Planaltina (DF).

⁽³⁾ Pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas, CEP 13001 Campinas (SP). Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Engenheiro Químico. Chefe da área de desenvolvimento de processos da PETROFERTIL, CEP 20031 Rio de Janeiro (RJ).

⁽⁵⁾ Engenheiro de Processamento do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (PETROBRÁS), CEP 21910 Rio de Janeiro (RJ).

INTRODUÇÃO

Estimada em 423.000.000 de toneladas, a jazida fosfática de Patos de Minas (MG) representa uma grande reserva deste recurso natural, com teor em P_2O_5 de aproximadamente 12% (Espinoza et al., 1985). Semelhantemente à maioria dos fosfatos naturais brasileiros, sua utilização direta na agricultura é limitada, pela sua baixa solubilização nos solos, conforme vários autores (Korndörfer, 1978; Goedert & Lobato, 1980; Raij & Diest, 1980). Assim, o aproveitamento racional desses recursos naturais requer a utilização de tratamentos químicos ou térmicos dos concentrados fosfáticos, visando à obtenção de fertilizantes solúveis e prontamente disponíveis às plantas.

Com relação ao aspecto tecnológico, o concentrado fosfático de Patos de Minas apresenta uma série de problemas, devido ao seu elevado teor de impurezas, principalmente compostos de ferro, alumínio e silício. Consequentemente, o seu teor em P_2O_5 é baixo, por volta de 24%, contra aproximadamente 36% dos concentrados que vêm sendo utilizados para produção de superfosfatos (Espinoza et al., 1985). Esse problema inviabiliza a utilização do concentrado de Patos de Minas para a produção desses fertilizantes, pois os produtos obtidos apresentam teor de P_2O_5 total abaixo do especificado pela legislação brasileira. Além disso, o elevado teor de impurezas concorre para um aumento no consumo de ácido sulfúrico por unidade de fósforo solúvel produzido.

Desse modo, vêm-se estudando alternativas tecnológicas para o aproveitamento do concentrado de Patos de Minas, entre elas a acidulação parcial com ácido sulfúrico (Franco, 1977; Cekinski & Bettiol, 1983); solubilização através de ácido nítrico (Martins, 1981); solubilização através de adutos de uréia (Ballio, 1981; Martins & Cekinski, 1982) e solubilização via térmica (Ferreira & Kaminski, 1979).

Um processo estudado recentemente pelo Centro de Pesquisas da PETROBRÁS, que vem sendo denominado de rota não-convencional (RNC), consiste na solubilização do concentrado fosfático através de bissulfato de amônio. A utilização deste acidulante para solubilização total de rochas fosfáticas tem sido objeto de estudo em outros países, conforme revisão efetuada por Hussien (1979). O processo RNC, contudo, introduz o conceito de acidulação parcial na rota do bissulfato de amônio, cujas características e vantagens em nível tecnológico foram apresentadas recentemente (Albuquerque & Costa, 1987).

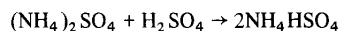
Os objetivos deste trabalho são descrever sumariamente o processo RNC e avaliar a eficiência agrônômica de fontes resultantes deste processo, obtidas a partir do concentrado fosfático de Patos de Minas.

MATERIAL E MÉTODOS

Avaliou-se a eficiência agrônômica dos fosfatos através de ensaios em casa de vegetação no Instituto Agrônomo de São Paulo (IAC), em Campinas (SP), e no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), em Planaltina (DF). As fontes foram produzidas pelo Centro de Pesquisas da PETROBRÁS (CENPES), a partir do concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), com 23,1% de P_2O_5 total, 32,7% de CaO, 23,7% de SiO_2 , 9,3% de Al_2O_3 e 3,1% de Fe_2O_3 . Inicialmente, produziram-se quinze fontes numa ampla faixa de tratamentos, conforme comentado adiante, avaliando-as em um primeiro ensaio em ambos os locais.

Posteriormente, produziram-se mais oito fontes, testadas numa faixa mais restrita, avaliando-as nos dois locais em um segundo ensaio.

O processo RNC se caracteriza pela solubilização parcial ou total da apatita através do tratamento com bissulfato de amônio, o que o difere dos processos de acidulação simples onde se utilizam comumente os ácidos sulfúrico, fosfórico ou nítrico, para produção de superfosfatos, nitrofosfatos ou fosfatos parcialmente acidulados. O bissulfato de amônio (BA) é obtido através da reação equimolar entre sulfato de amônio (SA) e ácido sulfúrico (AS), segundo esquematizado a seguir:



Assim, no processo RNC, o poder acidulante do AS é substituído total ou parcialmente pelo BA. Esta substituição é dada pela relação molar SA/AS, onde uma relação 1,0 indica que todo AS foi reagido com SA, obtendo-se assim o BA. Relações inferiores a 1,0 indicam uma mistura de BA e AS.

No quadro 1 encontram-se as relações molares, solubilidade e composição química dos fosfatos avaliados nos dois ensaios. As fontes foram produzidas numa larga faixa de acidulação, que se encontra expressa através da relação molar H^+/P_2O_5 , variando de 1,0 a 4,1, onde o H^+ é proveniente do BA ou AS, e o P_2O_5 do concentrado fosfático. A substituição do AS por BA, expressa através da relação molar SA/AS, como se disse, variou de 0,0 a 1,0. A relação 0,0 indica ausência de SA no processo, ou seja, trata-se de uma acidulação parcial convencional com ácido sulfúrico. Não se considerando os efeitos das impurezas e admitindo-se que todo o P_2O_5 do concentrado fosfático esteja na forma de fluorapatita, necessitar-se-ia estequiometricamente para a sua conversão total a fosfato monocalcico uma relação molar H^+/P_2O_5 de aproximadamente 4,7.

Os fosfatos foram produzidos através de dois diferentes sistemas (Quadro 1): "contínuo" e "em batelada", que correspondem a variações no processo de adição do concentrado fosfático e acidulantes. No sistema "em batelada", a reação é processada em um reator de vidro com agitação mecânica, onde uma lama de rocha com sulfato de amônio recebe a adição de ácido sulfúrico, segundo a relação preestabelecida. No "contínuo", a reação é processada em um granulador, onde uma corrente de polpa de rocha com sulfato de amônio é continuamente aspergida com ácido sulfúrico, sendo que a reação se processa com menor quantidade e melhor contato entre os materiais.

Como resultado final dos tratamentos, foram obtidas fontes que apresentam em sua composição, além do P_2O_5 de 14,1 a 20,1%, um pequeno teor de nitrogênio e teor médio de enxofre, de acordo com as relações molares utilizadas.

Para a avaliação agrônômica usou-se o milho como planta teste, em ambos os locais e ensaios. Empregaram-se vasos com 3,0kg de solo, com exceção do segundo ensaio no IAC, com vasos de 2,5kg. O solo utilizado pelo IAC nos dois ensaios foi um latossolo vermelho-amarelo textura média, que havia recebido calagem para elevação da saturação por bases a 70%. A análise acusou 68% de saturação por bases, pH ($CaCl_2$ 0,01 M) 5,2 e 5 ppm de P extraído pelo método da resina. No CPAC, utilizou-se no primeiro ensaio um latossolo vermelho-escuro textura argilosa que havia recebido 4,0 toneladas de calcário dolomítico/hectare (PRNT = 100%). A análise acusou pH em água 5,9 e 1,7 ppm

de P extraído pelo método de Mehlich I. No segundo ensaio, empregou-se um latossolo vermelho-amarelo textura média que havia recebido 3,5 toneladas de calcário dolomítico/hectare (PRNT = 100%), apresentando pH em água 6,3 e 0,7 ppm de P extraído pelo método de Mehlich I. Todos esses solos são considerados de muito baixa disponibilidade de fósforo, de acordo com os teores mencionados.

A adubação básica no IAC para o primeiro ensaio consistiu em 200mg de N, 400mg de K e 65mg de S, além de solução de micronutrientes e mais 100mg de N em cobertura por vaso. No segundo, aplicaram-se 150mg de N e 200mg de S, efetuando-se um nivelamento segundo os teores apresentados pelas fontes testadas. Além disso, 250mg de K e solução de micronutrientes. No CPAC, em ambos os ensaios, aplicaram-se 450mg de N, 360mg de S, 500mg de K e 150mg de FTE BR-12, sendo as doses de N e S niveladas no segundo ensaio, de acordo com os teores apresentados pela fontes.

Os fosfatos foram avaliados para a dose equivalente a 40 ppm de P total aplicado. Como fonte de referência, utilizou-se o superfosfato triplo, tendo-se uma curva de res-

posta variando de 0 a 100 ppm de P aplicado. A eficiência agrônômica das fontes foi avaliada em relação a fósforo absorvido pelas plantas, que foram cultivadas por 30 a 40 dias, dependendo dos locais e ensaios. Em todos os ensaios, verificaram-se respostas a fósforo praticamente lineares para o intervalo de 0 a 40 ppm de P aplicado na forma de superfosfato triplo, com acréscimos na absorção de fósforo variando de 121 a 628%.

Quantificou-se a eficiência dos fosfatos através do índice de eficiência agrônômica (IEA), definido como a relação percentual entre P absorvido da fonte testada e do superfosfato triplo, aplicados na mesma dose, subtraindo-se de ambos a quantidade de P absorvido do tratamento testemunha, segundo este esquema:

$$IEA\% = \frac{P \text{ absorvido do fosfato} - \text{testemunha}}{P \text{ absorvido do superfosfato triplo} - \text{testemunha}} \times 100$$

Através de regressão múltipla, avaliou-se o efeito dos parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS sobre a solubilidade em água e ácido cítrico e IEA dos fosfatos produzidos nos dois sistemas. A contribuição dos parâmetros foi estimada através

Quadro 1. Caracterização química e índice de eficiência agrônômica (IEA) dos fosfatos produzidos sob dois sistemas e avaliados em dois locais: Instituto Agrônômico de Campinas (IAC) e Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC)

Fosfatos	Relações molares		Teor total			P ₂ O ₅ solúvel (% do total) ⁽¹⁾		IEA	
	H ⁺ /P ₂ O ₅	SA/AS	P ₂ O ₅	N	S	Água	Ácido cítrico	IAC	CPAC
Sistema contínuo (ensaio nº 1)									
1	1,0	1,0	19,4	1,9	4,4	19,5	47,0	41	30
2	2,5	0,0	19,1	0,0	5,4	50,0	74,1	72	45
3	2,5	1,0	14,6	3,8	8,7	56,5	76,0	117	92
4	2,5	1,0	15,1	3,8	8,8	57,1	89,0	137	99
5	4,0	0,0	17,2	0,0	7,8	72,4	84,7	92	66
6	4,1	0,6	14,5	3,4	10,6	83,5	98,5	164	127
Sistema em batelada (ensaio nº 1)									
7	1,0	0,5	20,1	1,0	3,4	16,2	45,1	47	30
8	1,0	1,0	19,4	1,9	4,4	17,5	45,5	35	40
9	1,0	1,0	19,5	1,9	4,4	17,3	45,1	18	34
10	2,2	1,0	17,2	3,6	8,2	39,7	64,8	65	54
11	2,5	0,0	19,3	0,0	5,3	31,3	66,1	94	36
12	2,5	0,5	17,5	2,0	7,2	38,5	69,8	98	48
13	2,5	1,0	15,4	3,8	8,8	39,0	69,5	45	60
14	2,5	1,0	15,7	3,8	8,8	39,9	76,2	41	52
15	3,3	1,0	14,1	4,5	10,5	54,6	80,5	109	99
Sistema em batelada (ensaio nº 2)									
16	2,5	0,5	18,4	2,3	7,8	29,8	70,0	70	52
17	2,5	1,0	16,6	4,1	9,3	32,3	76,5	80	41
18	2,75	0,5	17,9	2,4	8,3	34,3	70,7	81	54
19	3,0	0,5	17,7	2,6	8,8	44,6	71,7	81	62
20	3,0	1,0	15,5	4,6	10,5	37,4	76,1	90	52
21	3,25	0,5	17,0	2,7	9,3	44,5	77,7	98	54
22	3,5	0,5	16,6	2,9	9,8	49,5	86,8	98	50
23	3,5	1,0	14,6	5,0	11,5	52,5	92,5	93	69

⁽¹⁾ P₂O₅ solúvel em solução de ácido cítrico a 2% na relação fosfato:solução = 1:100; P₂O₅ solúvel em água na relação fosfato:água = 1:250.

dos coeficientes de determinação parciais, que exprimem a contribuição marginal de uma variável pela redução percentual na soma de quadrados do resíduo (SQR), quando a outra variável já está presente no modelo (Neter & Wasserman, 1974).

O efeito dos tratamentos sobre o IEA foi avaliado separadamente por local, e apenas para o primeiro ensaio, com maior amplitude de tratamentos. Os resultados de IEA, agrupados dos dois locais e ensaios, foram correlacionados com a solubilidade dos fosfatos, mediante regressão simples.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Solubilidade dos fosfatos

No quadro 1 encontram-se as solubilidades dos fosfatos em água e ácido cítrico. Os efeitos isolados dos parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS, bem como o efeito conjunto, estão expressos através dos coeficientes de determinação (r^2) apresentados no quadro 2. Como se pode observar, a solubilidade está diretamente relacionada à taxa de acidulação, responsável pela conversão da apatita para compostos solúveis em água e ácido cítrico. O mesmo tem sido mostrado em outros trabalhos (Barreto, 1977; Franco, 1977; Ferreira & Kaminski, 1979; Cekinski & Bettiol, 1983).

Isoladamente, o efeito do sulfato de amônio, expresso pela relação SA/AS, não foi significativo (Quadro 2), e também não resultou em acréscimos consideráveis sobre os

coeficientes de determinação das equações de regressão múltipla, se comparados aos coeficientes das equações de regressão simples envolvendo apenas o parâmetro H^+/P_2O_5 .

No quadro 3 são apresentadas as equações de regressão múltipla para a solubilidade dos fosfatos, produzidos através dos dois sistemas, e os coeficientes de determinação parciais para os dois parâmetros. A comparação dos sistemas, através das equações de regressão (Neter & Wasserman, 1974), acusou diferença ($p < 0,05$) apenas com relação à solubilidade em água. No sistema "contínuo" o parâmetro H^+/P_2O_5 apresenta um coeficiente de 20,6, contra 13,4 no sistema "em batelada", mostrando que para uma mesma taxa de acidulação se obteve maior conversão em água no primeiro.

Os coeficientes de determinação parciais e respectivos níveis de significância mostraram um efeito significativo da relação SA/AS sobre a solubilidade cítrica dos fosfatos produzidos "em batelada". Embora o efeito seja pequeno, o que se pode observar pelo coeficiente deste parâmetro, tais resultados mostram, para uma mesma taxa de acidulação, um aumento na conversão cítrica devido à adição do sulfato de amônio ao processo.

Albuquerque & Costa (1987) atribuem esse efeito às reações envolvendo os íons adicionados, que bloqueiam a ação das impurezas (compostos de alumínio, ferro e silício) presentes em grande quantidade no fosfato-de-patos, e que atuam negativamente sobre a solubilização ácida da apatita. Os mesmos autores, em estudo mais detalhado, verificaram

Quadro 2. Coeficientes de determinação simples (r^2) das equações de regressão linear simples e múltipla envolvendo os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS, para a solubilidade em água e ácido cítrico dos fosfatos produzidos sob dois sistemas

	Sistema contínuo ⁽¹⁾			Sistema em batelada ⁽²⁾		
	H^+/P_2O_5	SA/AS	$H^+/P_2O_5 + SA/AS$	H^+/P_2O_5	SA/AS	$H^+/P_2O_5 + SA/AS$
	r^2					
Água	0,944**	0,142 ⁽³⁾	0,972**	0,851***	0,006	0,887***
Ácido cítrico	0,768*	0,059 ⁽³⁾	0,838	0,935***	0,0002	0,952***

* **, *** $P < 0,05$, $< 0,01$ e $< 0,001$ respectivamente.

(1) Número de fosfatos: 6; coeficiente de correlação simples (r) entre os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS = -0,532.

(2) Número de fosfatos: 17; coeficiente de correlação simples (r) entre os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS = -0,123.

(3) O coeficiente de correlação simples (r) é negativo.

Quadro 3. Equações de regressão múltipla e coeficientes de determinação (r^2) parciais dos parâmetros H^+/P_2O_5 (x) e SA/AS (z), para a solubilidade em água e ácido cítrico dos fosfatos produzidos sob dois sistemas⁽¹⁾

Fósforo solúvel	Sistema contínuo	Sistema em batelada
Água	$y = -6,1 + 20,6x + 8,8z$ ($r^2 = 0,972^{**}$) $r_x^2 = 0,967^{**}$ $r_z^2 = 0,491$	$y = -2,5 + 13,4x + 7,1z$ ($r^2 = 0,887^{***}$) $r_x^2 = 0,886^{**}$ $r_z^2 = 0,241$
Ácido cítrico	$y = 28,9 + 16,1x + 11,3z$ ($r^2 = 0,838$) $r_x^2 = 0,828^*$ $r_z^2 = 0,301$	$y = 24,1 + 16,5x + 5,88z$ ($r^2 = 0,952^{***}$) $r_x^2 = 0,953^{**}$ $r_z^2 = 0,272^*$

(1) Os coeficientes de determinação parciais também podem ser obtidos através da fórmula dada por Neter & Wasserman (1974, p.266), em função dos coeficientes de determinação e correlação simples apresentados no quadro 2.

efeito positivo da adição de sulfato de amônio sobre a solubilização do fosfato-de-patos, principalmente com relação à conversão em água, o que não foi verificado no presente trabalho (Quadro 3).

Os interceptos das equações de regressão (Quadro 3) mostram valores próximos a zero para solubilidade em água, e na faixa de 20% para solubilidade cítrica, o que está de acordo com a solubilidade do concentrado fosfático de Patos "in natura" (Korndörfer, 1978; Alcarde & Ponchio, 1980).

Eficiência agronômica

De maneira geral, o IEA dos fosfatos (Quadro 1) foi superior nos ensaios no IAC. Contudo, as tendências dos dois locais foram semelhantes, já que o coeficiente de correlação (r) para os resultados do primeiro ensaio foi de 0,852***. Alguns fosfatos se destacaram, apresentando IEA superior a 100%, ou seja, mostraram comportamento agrônomo superior ao superfosfato triplo.

Os efeitos isolados dos parâmetros, bem como as equações de regressão múltipla e r^2 parciais, encontram-se nos quadros 4 e 5 respectivamente. A taxa de acidulação teve influência direta sobre o IEA, reflexo do grau de solubilidade dos fosfatos. Resultados semelhantes foram obtidos por Franco (1977), Ferreira & Kaminski (1979) e Goedert & Sousa (1986).

Os coeficientes de determinação das equações de regressão linear simples para os dois parâmetros (Quadro 4) mos-

tram que a relação SA/AS, isoladamente, não teve efeito significativo sobre a eficiência agronômica dos fosfatos, independentemente dos sistemas de preparo ou local de ensaio. Contudo, os coeficientes de determinação das equações de regressão múltipla são superiores aos coeficientes da regressão simples envolvendo apenas o parâmetro H^+/P_2O_5 , principalmente no sistema "contínuo". Neste, a ausência de significância estatística das regressões simples com H^+/P_2O_5 e múltipla, deve-se em parte ao baixo número de observações, já que se trata apenas de seis fosfatos.

Somente no IAC foi verificada diferença significativa ($p < 0,05$) entre os sistemas de produção dos fosfatos, comparando-se as equações de regressão do quadro 5. Contudo, em ambos os locais, verificaram-se as mesmas tendências de maiores valores para os coeficientes dos dois parâmetros no sistema "contínuo", indicando maior eficiência agronômica dos fosfatos produzidos neste sistema, para a maioria das relações molares testadas.

Os coeficientes de determinação parcial (Quadro 5) mostram que, no ensaio no CPAC, o parâmetro SA/AS influenciou positivamente a eficiência agronômica dos fosfatos preparados sob os dois sistemas, o que está de acordo com o incremento verificado na solubilidade cítrica para os fosfatos produzidos no sistema "em batelada". No IAC, foi observada uma tendência semelhante para o sistema "contínuo", não ocorrendo o mesmo com o sistema "em batelada", já que o coeficiente do parâmetro SA/AS assumiu valor negativo, porém estatisticamente não diferente de zero.

Quadro 4. Coeficientes de determinação simples (r^2) das equações de regressão linear simples e múltipla envolvendo os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS, para o índice de eficiência agronômica (IEA) dos fosfatos produzidos sob dois sistemas e avaliados em dois locais

IEA	Sistema contínuo ⁽¹⁾			Sistema em batelada ⁽²⁾		
	H^+/P_2O_5	SA/AS	$H^+/P_2O_5 + SA/AS$	H^+/P_2O_5	SA/AS	$H^+/P_2O_5 + SA/AS$
	r^2					
IAC	0,450	0,032	0,850	0,575*	0,220 ⁽³⁾	0,757*
CPAC	0,416	0,061	0,900*	0,598*	0,175	0,812**

(1) Número de fosfatos: 6; coeficiente de correlação simples (r) entre os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS = -0,532.

(2) Número de fosfatos: 9; coeficiente de correlação simples (r) entre os parâmetros H^+/P_2O_5 e SA/AS = -0,057.

(3) O coeficiente de correlação simples (r) é negativo.

Quadro 5. Equações de regressão múltipla e coeficientes de determinação (r^2) parciais dos parâmetros H^+/P_2O_5 (x) e SA/AS (z), para o índice de eficiência agronômica (IEA) de fosfatos produzidos sob dois sistemas e avaliados em dois locais⁽¹⁾

IEA	Sistema contínuo	Sistema em batelada
IAC	$y = -52,6 + 41,7x + 68,5z$ ($r^2 = 0,850$) $r_x^2 = 0,845^*$ $r_z^2 = 0,726$	$y = 33,7 + 27,7x - 37,4z$ ($r^2 = 0,757^*$) $r_x^2 = 0,689^*$ $r_z^2 = 0,428$
CPAC	$y = -54,9 + 34,2x + 61,1z$ ($r^2 = 0,900^*$) $r_x^2 = 0,893^*$ $r_z^2 = 0,829^*$	$y = -10,8 + 19,7x + 26,5z$ ($r^2 = 0,812^{**}$) $r_x^2 = 0,773^{**}$ $r_z^2 = 0,533^*$

(1) Os coeficientes de determinação parciais também podem ser obtidos através da fórmula dada por Neter & Wasserman (1974) em função dos coeficientes de determinação e correlação simples apresentados no quadro 4.

Eficiência agrônômica x solubilidade

A solubilidade de fertilizantes fosfatados em água ou extratores químicos é comumente utilizada para a avaliação da disponibilidade de fósforo, sendo a apresentação dos teores solúveis em ácido cítrico ou citrato neutro de amônio prevista pela legislação brasileira. Na figura 1, aparecem plotados em conjunto os IEAs obtidos nos dois ensaios em ambos os locais, em função da solubilidade dos fosfatos em água e ácido cítrico.

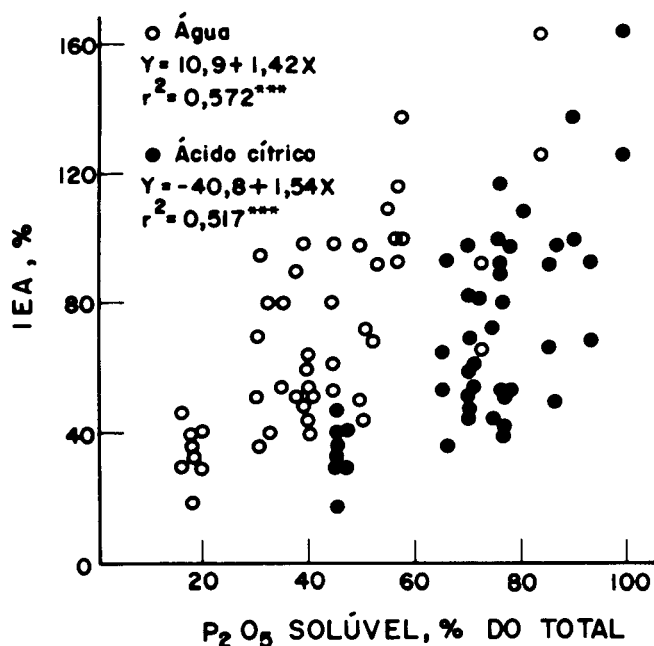


Figura 1. Valores agrupados do índice de eficiência agrônômica (IEA) dos fosfatos, obtidos nos dois locais e ensaios, em função das respectivas solubilidades em água e em ácido cítrico.

Pesquisas envolvendo diferentes tipos de fertilizantes fosfatados têm mostrado boa correlação entre eficiência agrônômica e solubilidade cítrica (Korndörfer, 1978; Oliveira et al., 1984). Trabalhos recentes em casa de vegetação, com diversos fosfatos brasileiros parcialmente acidulados, têm revelado que os valores numéricos do IEA são muito próximos da sua solubilidade em ácido cítrico (Goedert & Sousa, 1986; Siqueira et al., 1986); isso demonstra o valor desse tipo de análise na predição da disponibilidade imediata de fósforo às plantas. Contudo, a solubilidade em água refletiu, no caso, um pouco melhor a eficiência agrônômica dos fertilizantes — Figura 1.

Embora as equações de regressão apresentadas nessa figura sejam altamente significativas, explicam apenas pouco mais de 50% do comportamento agrônômico dos fosfatos, o que pode ser atribuído em parte ao agrupamento dos dados dos diversos ensaios.

CONCLUSÕES

1. A solubilidade e eficiência agrônômica dos fosfatos esteve diretamente relacionada à taxa de acidulação, independentemente do sistema de preparo dos fosfatos e local dos ensaios.

2. Já o efeito da adição do sulfato de amônio, ou substituição do ácido sulfúrico por bissulfato de amônio, foi pequeno, porém positivo, com relação à solubilidade cítrica para o sistema de preparo “contínuo” e à eficiência agrônômica em um dos ensaios.

3. Os resultados obtidos sugerem a necessidade de outros experimentos com o objetivo de melhor avaliar o efeito do sulfato de amônio sob sistemas de preparo dos fosfatos e níveis de acidulação, utilizando-se maior número e melhor combinação de tratamentos, no que se refere às relações molares H^+/P_2O_5 e sulfato de amônio/ácido sulfúrico.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, P.C.W. de & COSTA, F.G.M. Rotas tecnológicas não tradicionais para solubilização de fosfatos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3., Brasília, 1986. Anais. São Paulo, Instituto Brasileiro do Fósforo, 1987. p.339-361.
- ALCARDE, J.C. & PONCHIO, C.O. Caracterização das solubilidades das rochas fosfatadas brasileiras e termofosfatos em diferentes extratores químicos. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 4:196-200, 1980.
- BALLIO, L.A. Processo de solubilização da rocha fosfática através da implementação do uso da uréia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 2., Brasília, 1981. Anais. São Paulo, Instituto Brasileiro de Fósforo, 1981. p.141-164.
- BARRETO, A.C. Efeitos da acidulação parcial de misturas com superfosfato triplo e enxofre e da granulação na eficiência de fosfatos naturais. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1977. 63p. (Tese de Mestrado)
- CEKINSKI, E. & BETTIOL, W. Fósforo parcialmente acidulado: um produto promissor. Fertilizantes, São Paulo, 5:8-12, 1983.
- ESPINOZA, W.; OLIVEIRA, A.J. & CONTINI, E. Produção e uso de rochas fosfáticas no Brasil. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1985. 105p. (EMBRAPA — DEP. Documentos, 18)
- 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, Campinas, 3:158-162, 1979.
- FRANCO, M. Fosfatos naturais parcialmente acidulados com H_3PO_4 , HCl e H_2SO_4 na cultura de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em um solo de cerrado de Ituiutaba-MG. Viçosa, Faculdade de Agronomia da UFV, 1977. 75p. (Tese de Mestrado)
- GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. Pesq. agropec. bras., Brasília, 15:311-318, 1980.
- GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. de. Avaliação preliminar da eficiência de fosfatos com acidulação parcial. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 10:75-80, 1986.
- HUSSEIN, M. Extraction of Egyptian rock phosphate with ammonium bisulfate. Part I. Review on solubilization of rock phosphate by ammonium bisulfate. Chem. Econ. & Eng. Rev., Tokyo, 11:47-48, 1979.

- KORNDÖRFER, G.H. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais fornecerem fósforo para plantas de trigo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978. 61p. (Teses e Monografias, 7)
- MARTINS, W. Nitrofosfatos: Araxá e Patos de Minas no processo ODDA. Fertilizantes, São Paulo, 3(3):8-10, 1981.
- MARTINS, W. & CEKINSKI, E. Solubilização do concentrado fosfático por aduto de uréia. Fertilizantes, São Paulo, 4:5-7, 1982.
- NETER, J. & WASSERMAN, W. Applied linear statistical models. Homewood, Richard D. Irwin, 1974. 842p.
- OLIVEIRA, E.L.; MUZILLI, O.; IGUE, K. & TORNERO, T.T. Avaliação da eficiência agronômica de fosfatos naturais. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 8:63-67, 1984.
- RAIJ, B. van & DIEST, A. van. Phosphate supplying power of rock phosphates in an oxisol. Pl. Soil, The Hague, 55:97-107, 1980.
- SIQUEIRA, O.J.F. de; PERUZZO, G. & BEN, J.R. Avaliação da eficiência agronômica de diversas fontes de fósforo nacionais parcialmente solúveis - Trigo, 1984. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO, 14. Resultados de Pesquisa do Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Londrina, 1986. p.229-232.