

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

**Eficiência agronômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição  
do uso de fosfatos naturais**

**Daniela da Silva Benedito**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas**

**Piracicaba  
2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Daniela da Silva Benedito**  
**Engenheira Agrônoma**

**Eficiência agronômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição do uso de  
fosfatos naturais**

**Orientador:**  
**Prof. Dr. LUÍS IGNÁCIO PROCHNOW**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas**

**Piracicaba**  
**2007**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Benedito, Daniela da Silva

Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição do uso de fosfatos naturais / Daniela da Silva Benedito. - - Piracicaba, 2007.  
121 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Fertilizantes fosfatados 2. Fosfatos 3. Fósforo 4. Química do solo I. Título

CDD 631.41

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

*Ao grande Deus detentor de toda força e luz,  
sempre presente na caminhada da vida,  
rumando em busca da felicidade.*

### **OFEREÇO**

*Ao meu filho, Luiz Felipe,  
meu Amor maior e mais pleno;*

*À minha tão amada e querida mãe, Dirce,  
exemplo maior de mulher batalhadora e perseverante,  
que sempre lutou, e luta, para fazer o caminho pela vida cada dia mais feliz;*

*A toda minha família,  
pessoas essenciais nessa trajetória.*

### **DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e à Comissão de Pós-Graduação do Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade concedida para realização do curso.

Ao Luís Ignácio Prochnow, meu orientador, exemplo de ser humano, no sentido literal da expressão, e profissional, pelos ensinamentos de vida e profissão que me foram passados. Agradeço também pela imensa amizade, confiança, compreensão e paciência que teve durante todo o decorrer desse curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu namorado Leandro Pineda pelo companheirismo, amizade, respeito e presença especial em minha vida.

Aos funcionários João e Leandro, técnicos do Laboratório de Fertilizantes do Departamento de Ciência do Solo – ESALQ/USP, pelo apoio constante na execução dos testes de solubilidade de fósforo.

À Maria Cristina Motta de Toledo e Aline Silverol, integrantes da equipe Humifert, pelo constante auxílio na condução desse trabalho.

À Fundação MT pelo grande apoio na condução do experimento para validação do PRDSS.

Aos amigos Gean, Graziela, Eros e Rodrigo pela amizade, auxílio no desenvolvimento desse projeto e pelo ótimo convívio durante o curso e, especialmente ao amigo Adilson, pelos grandes auxílios estatísticos e companheirismo em todos os momentos.

Aos estagiários Johnny e Larissa pelo auxílio na condução e avaliação dos experimentos.

Às amigas Gladys, Camila, Susian, LÍlian, Mara, Fernanda Carvalho e Josiane, pessoas muito especiais pela grande amizade, incentivo, diversão e muita força nessa fase.

À funcionária Martinha, pessoa muito iluminada, pelas palavras carinhosas de apoio, incentivo, conselhos e, principalmente, verdadeira amizade demonstrada.

Às funcionárias Jackeline, Karina, Nancy, Marta e Flávia, do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, pela constante cooperação no encaminhamento desse trabalho.

Ao motorista Dorival, sempre muito solícito, pelas coletas das amostras de solo utilizadas na condução dessa pesquisa e aos funcionários Fernando e Hudso pelo auxílio na condução dos experimentos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para execução deste trabalho.

“Isso nós sabemos.  
Todas as coisas são conectadas  
como o sangue  
que une uma família...”

O que acontecer com a terra  
acontecerá com os filhos e filhas da terra.  
O Homem não teceu a teia da vida,  
ele é dela apenas um fio.  
O que ele fizer para a teia  
estará fazendo a si mesmo.”

Ted Perry

## SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	11
Referências.....	14
2 REVISÃO: FONTES ALTERNATIVAS DE FÓSFORO.....	16
Resumo.....	16
Abstract.....	16
2.1 Introdução.....	17
2.2 Desenvolvimento.....	18
2.2.1 A importância do fósforo para as plantas.....	18
2.2.2 A necessidade de adubação fosfatada.....	19
2.2.3 Reação do fósforo nos solos agricultáveis.....	23
2.2.4 Fontes tradicionalmente empregadas.....	25
2.2.5 Fontes alternativas.....	28
2.2.5.1 Termofosfatos.....	29
2.2.5.2 Fosfatos naturais.....	33
2.2.5.3 Fosfatos naturais parcialmente acidulados.....	37
2.2.5.4 Mistura de fontes de diferentes solubilidades.....	41
2.2.5.5 Solubilização da rocha fosfática por materiais orgânicos.....	46
2.2.5.6 Outras fontes alternativas de fósforo.....	49
2.3 Conclusões.....	52
Referências.....	53
3 EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE COMPOSTOS ORGANO-FOSFATADOS OBTIDOS PELO PROCESSO HUMIFERT.....	64
Resumo.....	64
Abstract.....	65
3.1 Introdução.....	65
3.2 Desenvolvimento.....	69

3.2.1 Material e Métodos.....	69
3.2.1.1 Definição e caracterização das matérias primas usadas no processo Humifert.....	69
3.2.1.2 Funcionamento do equipamento Humifert.....	71
3.2.1.3 Produção dos compostos.....	73
3.2.1.4 Caracterização dos materiais.....	74
3.2.1.5 Experimentos agronômicos.....	74
3.2.2 Resultados e discussão.....	81
3.2.2.1 Produção dos compostos – testes de tempo de exposição dos materiais.....	81
3.2.2.2 Eficiência agronômica de mistura de rocha fosfática de Patos de Minas com turfa submetidos ao processo Humifert.....	82
3.2.2.3 Eficiência agronômica de mistura de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa submetidos ao processo Humifert .....	83
3.3 Conclusões.....	86
Referências.....	87
4 MODELO DE PREDIÇÃO DO USO DE FOSFATOS NATURAIS EM CONDIÇÕES BRASILEIRAS.....	89
Resumo.....	89
Abstract.....	90
4.1 Introdução.....	90
4.2 Desenvolvimento.....	99
4.2.1 Material e métodos.....	99
4.2.2 Resultados e discussão.....	104
4.3 Conclusão.....	109
Referências.....	109
APÊNDICES.....	112

## RESUMO

### **Eficiência agronômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição do uso de fosfatos naturais**

Os fertilizantes fosfatados (FF) mais utilizados na agricultura são solúveis em água, e requerem enxofre elementar e concentrados apatíticos de elevada qualidade para produção, conduzindo à subutilização dos depósitos de fosfato (perdas elevadas de P no beneficiamento). Conseqüentemente, é necessário estudar as fontes alternativas de P. Neste trabalho foram estudadas quanto à: (i) revisão de literatura que tenta mostrar a situação atual no Brasil e no mundo; (ii) produção alternativa de fonte de P que integra matéria orgânica e RF (Humifert); e (iii) utilização de software para predizer a eficiência agronômica (EA) de RF, relativamente às fontes de P solúveis em água. Na revisão da literatura foram enfatizados: tratamento térmico, acidulação parcial, compactação ou mistura com FF solúveis em água, tratamentos com resíduos orgânicos e/ou microrganismos. Outros aspectos apontaram: (i) condições gerais para utilizar fontes de P de elevada solubilidade em água e alternativas; (ii) manejo de solos prevendo solubilização de formas de P nativo e aumento na EA de fontes de P através de cultivos precedentes ou microrganismos; (iii) calcinação de RFs do tipo Ca-Al-P (crandallita); e (iv) necessidade de pesquisas com fontes alternativas de P em condições de casa-de-vegetação e campo. Quanto ao processo Humifert, um reator foi construído para trabalhar em escala de bancada. Os objetivos foram gerar informações sobre produção dos fertilizantes “Humifert” e testar a EA dos mesmos. Diversos testes foram conduzidos quanto às condições de operação do equipamento, como tempo de reação e solubilidade dos materiais produzidos. Dois experimentos agronômicos foram conduzidos em casa-de-vegetação, relacionando os resultados dos produtos obtidos no equipamento com fonte padrão de P. Esse processo conduz a desempenho agronômico superior da RF quando comparada a mesma sem submissão às reações. Embora algumas vantagens em aumento de produção devido ao Humifert, a solubilidade e os resultados agronômicos indicam necessidade de mais pesquisas para adequar as reações, para obter fontes de P de melhor qualidade. O software para predizer a eficiência das RFs denomina-se “Phosphate Rock Decision Support System” (PRDSS) e foi desenvolvido com colaboração entre “IFDC” e “IAEA”. O objetivo final é predizer a EA de RF específica relativamente a fontes de P de elevada solubilidade em água, considerando solo, características da RF, manejo do solo e clima na localidade. O experimento foi conduzido em Rondonópolis, em um LV com pH em água de 5,2, teor muito baixo de P e capacidade média de adsorção de P. As fontes de P utilizadas foram superfosfato simples, RF de Araxá e de Gafsa, aplicadas a lanço e incorporadas em 15 cm de solo, nas doses 60, 120 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total. Um controle foi adicionado para cada fonte de P. Os resultados de EAR para soja no campo foram de 100%, 51% e 97% para o SSP, RF Araxá e Gafsa, respectivamente. Os valores de EAR preditos pelo PRDSS foram de 33% e 100% para a RF Araxá e Gafsa, respectivamente, sendo consideradas boas estimativas da EAR real em condições brasileiras, inicialmente comprovando a aplicabilidade deste software para uso futuro.

Palavras-chave: Fontes alternativas de fósforo; Eficiência agronômica relativa; Processo Humifert; Predição do uso de fosfatos naturais

## ABSTRACT

### **Agronomic effectiveness of alternative sources of phosphorus and phosphate rock decision support system**

The most utilized phosphate fertilizers (PF) in agriculture are the water-soluble sources, that require elemental sulfur and high quality apatite concentrates for the production, leading to the subutilization of phosphate deposits (high losses of P during the beneficiation). Consequently, it is necessary to study the alternative sources of P. In this work they were studied as related to: (i) literature review trying to show the present situation in Brazil and worldwide, (ii) alternative production of a P source combining organic matter and PR (Humifert), and (iii) utilization of software to predict the agronomic effectiveness (AE) of PR, related to water-soluble P sources. For the literature review were emphasized: thermal treatment, partial acidulation, compaction with high water-soluble PF, organic residues and/or microorganisms treatments. Other aspects targeted: (i) general conditions to utilize high water-soluble P sources and alternatives, (ii) management of soils foreseeing the solubilization of forms of native P and increase in AE of P sources through previous crops or microorganisms, (iii) calcination of PRs of the type Ca-Al-P (crandallite), and (iv) requirement for research with different sources of P in greenhouse and field conditions. As related to the Humifert process a reactor was built to work in bench scale. The objectives were to generate information relative to the production of the "Humifert" fertilizers and test the AE of them. Several tests were applied as related to the operating conditions of the equipment, as reaction time and solubility. Two agronomic experiments were conducted in a greenhouse, relating the results of the products obtained in the equipment with a standard source of P. The process lead to higher agronomic performance of the PR, when comparing it without submission to the reactions. Although some advantages in increase of production due to the Humifert, the solubility and agronomic results indicate that more research is necessary to adequate the reaction to obtain better quality P sources. The software to predict PR effectiveness is called "Phosphate Rock Decision Support System (PRDSS)" and was developed in collaboration between "IFDC" and "IAEA". The final objective is to predict the RAE of a specific PR, as related to WSP sources, taking into consideration soil, PR characteristics, soil management and clima at locality. Our experiment was conducted in Rondonopolis, in an Oxisol with pH 5.2 in water, very low content of P and medium P adsorption capacity. The P sources utilized were the single superphosphate, the Araxa PR and Gafsa, all applied broadcasted to the soil into the 15 cm soil layer, in rates 60, 120 and 240 kg ha<sup>-1</sup> of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A control was added for each P source. The results for RAE for soybean at field condition were 100%, 51% and 97% for the SSP, Araxa PR and Gafsa, respectively. The RAE predicted by the PRDSS were of 33% and 100% for Araxa PR and Gafsa, respectively, which can be considered good estimates of the real RAE at Brazilian conditions, initially attesting the feasibility of this software for future use.

Keywords: Alternative sources of phosphorus; Relative agronomic effectiveness; Humifert process; Prediction in the use of phosphate rocks

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os macronutrientes, o fósforo (P) é o exigido em menores quantidades pela planta, entretanto trata-se do nutriente aplicado, historicamente, em maiores quantidades em adubação no Brasil.

A explicação para esse fato relaciona-se com a baixa disponibilidade de fósforo nos solos do Brasil e, também com a forte tendência do fósforo aplicado ao solo reagir com componentes do mesmo (RAIJ, 1991). Portanto, ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com fósforo assume a particularidade de ter-se que aplicar uma quantidade bem maior do que aquela realmente exigida pelas plantas, pois, antes de tudo, torna-se necessário satisfazer a “exigência” do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação de fósforo (ANGHINONI; BARBER, 1980).

De acordo com diversos autores, dentre eles Malavolta (2006), sem dúvida, trata-se do nutriente que mais limita a produção vegetal no Brasil e, a elevação de sua disponibilidade, de forma a vencer a barreira imposta pela “fome do solo” por este nutriente, é um dos grandes desafios no manejo da fertilidade do solo.

Os solos apresentam de 100 a 4400 kg ha<sup>-1</sup> de fósforo total na camada arável (0 a 20 cm). Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de fósforo em solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 e 1,0 kg ha<sup>-1</sup> de P, dado à elevada tendência de remoção do P da solução, tanto por precipitação com compostos de alumínio, ferro e cálcio quanto por adsorção específica (TISDALE et al., 1985; MALAVOLTA, 2006).

Segundo Stauffer e Sulewski (2003), a necessidade de P de uma região, em um contexto geral, é baseada em uma série de fatores, incluindo impacto da densidade populacional, condição de fertilidade do solo (histórico do uso de nutrientes), diversidade de culturas, objetivos de exportação versus consumo doméstico de alimentos, políticas governamentais e economia.

No Brasil, o consumo médio de P por hectare era marginal até a década de 70, mas desde esta época tem flutuado entre 30 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (PPI/PPIC, 2003).

Alguns estudos têm mostrado um quadro positivo para o consumo de fertilizantes fosfatados no Brasil até o ano de 2010. As perspectivas são de que o país estará produzindo 80,3 e 81,6% do consumo esperado de rocha fosfática e ácido fosfórico, respectivamente. Em termos de perspectivas de consumo aparente de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para todo o Brasil, dados mostram um aumento de 30% para o período de 2000 a 2010, passando de 2,59 para 3,37 milhões de toneladas, com

aumento sensível na participação da produção nacional em detrimento das importações, o que deverá ser mais acentuado nas regiões norte, nordeste e centro-oeste (REIS, 2002).

A maioria das rochas fosfáticas nacionais é de baixa reatividade e apresenta elevados teores de ferro e alumínio em sua constituição, proporcionando baixa disponibilidade de fósforo às culturas. Portanto, fertilizantes fosfatados solúveis têm sido utilizados preferencialmente para produção das culturas agrícolas (LANA et al., 2004).

A principal característica desses fertilizantes fosfatados é a elevada solubilidade em água, porém apresentam limitações econômicas e industriais, como a necessidade de enxofre para ser utilizado na acidulação, que é importado, e de concentrados fosfáticos como matéria-prima, com elevado teor de  $P_2O_5$  e baixo conteúdo de impurezas (RIEDER, 1986).

Portanto, o processo de produção dos fertilizantes fosfatados solúveis encarece o custo dos mesmos, tornando-os inacessíveis nas quantidades necessárias à parte dos agricultores, fato que induziu os pesquisadores a estudar fontes alternativas de fósforo (REIS, 2002).

Entende-se por fontes alternativas aquelas de menor solubilidade relativa em água e pode-se exemplificar com o tratamento térmico, a acidulação parcial, a adição de materiais orgânicos às rochas fosfáticas, o emprego de microrganismos, de forma a ampliar a solubilidade dos materiais, acarretando em maior eficiência agrônômica relativa e, na maioria dos casos, custo relativo inferior, já que exclui a necessidade de importação de matéria-prima para produção desse tipo de fonte de fósforo.

Nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas, como as rochas fosfáticas, aumentou acentuadamente, embora esses produtos apresentem baixa solubilidade em água quando comparados aos fosfatos solúveis (HOROWITZ; MEURER, 2003). Porém, ainda são relativamente escassas as pesquisas com algumas destas fontes de P e diante disso surgiu a idéia de realizar uma revisão de literatura sobre o assunto, com o objetivo de situar o uso dessas fontes na agricultura atual.

A produção de fertilizantes fosfatados gera muitos rejeitos, em todas as etapas, desde a lavra ao beneficiamento, passando pelos processos industriais de produção de fertilizantes e sua aplicação nos solos. Entre os rejeitos estão materiais ainda contendo P, mas cujo aproveitamento não é possível pelos atuais métodos industriais, representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, visto os grandes volumes envolvidos (SILVEROL, 2006).

Na tentativa de utilização desses rejeitos, foi proposto por pesquisadores franceses em 1988 o processo Humifert, baseando-se no tratamento da mistura de minérios fosfáticos com material orgânico. Na presença de umidade na mistura e com a formação de óxidos de nitrogênio na coluna do reator Humifert, ocorre a produção de ácido nítrico nascente, o que favorece a solubilização da rocha fosfática.

Assim, um dos objetivos do presente trabalho foi a produção experimental e a avaliação da eficiência agrônômica dos compostos organo-fosfatados obtidos pelo processo Humifert, em condições de casa-de-vegetação. Assumiu-se como hipótese que a eficiência agrônômica relativa desses compostos seria superior aquela proporcionada pela aplicação dos materiais isoladamente e sem exposição à reação no equipamento.

Diversos são os fatores que afetam a eficiência agrônômica (EA) das rochas fosfáticas para aplicação direta como: a fonte da rocha fosfática, as propriedades do solo e a espécie a ser cultivada, além das práticas de manejo e das condições agroclimáticas (LEON; FENTER; HAMMOND, 1986).

Com o objetivo de auxiliar na decisão sobre a aplicação de rocha fosfática nos solos foram criados alguns modelos matemáticos, porém focados no uso de rochas fosfáticas de elevada reatividade e pouco práticos para uso rotineiro (Smallberger et al., 2006). Daí surgiu a necessidade do desenvolvimento de um sistema de predição do uso de rocha fosfática com maior capacidade para prever a eficiência agrônômica destas em relação a fertilizantes fosfatados solúveis em água, denominado “Phosphate Rock Decision Support System” (PRDSS). Esse modelo proposto funciona com um *input* mínimo de dados, porém a predição é mais eficiente quando são adicionados dados mais detalhados sobre o solo, cultura e clima.

O PRDSS é um modelo matemático desenvolvido através de um processo interativo baseado na verificação de dados de experimentos conduzidos por pesquisadores colaboradores em alguns países em desenvolvimento, dentre eles o Brasil. Desta forma, esse trabalho teve também como objetivo gerar dados em condições de campo brasileiras para validar o protótipo do *software* PRDSS, proposto para avaliar a eficiência agrônômica e a viabilidade econômica do uso de rochas fosfáticas em comparação com fertilizantes fosfatados solúveis em água. Como hipóteses desta parte do trabalho assumiu-se que a predição adequada da eficiência agrônômica de fosfatos de rocha em relação aos fosfatos de elevada solubilidade em água é possível através do programa computacional PRDSS e que os dados de eficiência agrônômica obtidos em

experimento em condições de campo no Brasil corresponderão aproximadamente aos índices obtidos pelo modelo.

No sentido de colaborar com a produção e utilização de fontes alternativas de fósforo, este trabalho teve como objetivos: (i) revisar os principais fatores relacionados ao uso das fontes alternativas; (ii) produzir experimentalmente e avaliar a eficiência agrônômica de compostos fertilizantes organo-fosfatados, em condições de casa-de-vegetação, produzidos pelo processo Humifert; e (iii) gerar e testar dados, em condições de campo no Brasil, para avaliar o modelo de predição de uso de rochas fosfáticas denominado PRDSS.

### Referências

- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 1041-1044, 1980.
- BRANCO, S.M.; MURGEL, P.H.; CAVINATTO, V.M. Compostagem: solubilização biológica de rocha fosfática na produção de fertilizante organomineral. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 3, 2001 (Boletim Técnico).
- DIAS, G.L.S. Novos cenários para a agricultura e o mercado de fertilizantes. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES, 2, 2002, São Paulo. **Palestra...** São Paulo: ANDA, 2002. 364 p.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.1, p. 41-47, 2004.
- LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 525-528, 2004.
- LEON, L.A.; FENTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 798-802, 1986.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.
- RAIJ, B. van **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: CERES, POTAFOS, 1991. 343 p.
- REIS, N.P. Perspectivas para o fósforo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES, 2, 2002, São Paulo. **Palestra...** São Paulo: ANDA, 2002. 364 p.

RIEDER, J.H. Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 1986, Brasília. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1986. cap. 3, p. 135-172.

SMALLBERGER, S.A.; SINGH, U.; CHIEN, S.H.; HENAO, J.; WILKENS, P.W. Development and validation of a Phosphate Rock Decision Support System. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 471-483, 2006.

STAUFFER, M.D.; SULEWSKI, G. Fósforo – essencial para a vida. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...**São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726 p.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

## 2 REVISÃO: FONTES ALTERNATIVAS DE FÓSFORO

### Resumo

Denomina-se por fontes alternativas de fósforo aquelas de baixa solubilidade em água e entre os tratamentos alternativos que se têm submetido a rocha fosfática se enquadram os tratamentos térmicos a elevadas temperaturas, a acidulação parcial com ácido sulfúrico, a compactação ou mistura da rocha com materiais fosfáticos de maior solubilidade e a acidificação ou incubação com materiais orgânicos e microrganismos. Recomenda-se o uso das fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água em condições de baixa à moderada capacidade de fixação de P pelo solo, culturas de ciclo curto e solos com pH elevado, ou seja, que foram corrigidos pela calagem. Os termofosfatos e fosfatos naturais reativos podem ser mais eficientes em relação às fontes de P de elevada solubilidade em água em condições de elevada capacidade de fixação de P, solos ácidos e culturas de ciclo longo. Quanto às fontes alternativas fosfatos naturais parcialmente acidulados, fosfatos compactados e uso de materiais orgânicos para solubilizar as rochas fosfáticas, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas em condições nacionais por serem escassos os dados na literatura que forneçam suporte à predição de uso dessas fontes. Os mecanismos propostos de estímulo na solubilização e incremento da eficiência agronômica de rochas fosfáticas utilizando as próprias culturas ou microrganismos parecem ser tecnologias de baixo custo relativo e apropriadas para este fim. E, finalmente, é proposta a técnica da calcinação, empregada em fosfatos aluminosos e ferro-aluminosos, de reduzida eficiência agronômica, podendo, portanto, viabilizar a utilização desses fosfatos marginais.

Assim, no sentido de otimização do uso das rochas fosfáticas, conclui-se que há necessidade de novos estudos em condições de casa-de-vegetação e campo envolvendo, entre outros fatores, situações distintas quanto à aplicação de fontes alternativas, tempo de condução dos ensaios, sistemas de cultivo e solos, acarretando no melhor uso dessas fontes com relação aquelas de elevada solubilidade em água.

Palavras-chave: Fontes de fósforo

### Review: Alternative sources of phosphorus

#### Abstract

In this work, alternative sources of P mean those with relatively low water solubility obtained from the phosphate rock mainly by thermal treatment, partial acidulation, compaction with high water-soluble P fertilizers, organic residues and/or microorganism treatments. The utilization of high water-soluble P sources is generally recommended to soils with low to medium phosphorus adsorption capacity (PAC), short term crops and in soils with adequate pH for crop growth, i.e., limed soils to pH in water of about 6.0 - 6.5. Thermal treated phosphates and natural phosphate rocks can be more agronomically effective than water-soluble P sources in soils with high PAC, acid soils and long term crops. For the P sources resulting from partial acidulation, compaction and with the use of organic residues and/or microorganisms more ample agronomic

research is necessary. The management of soils foreseeing the solubilization of forms of native P and increase in the agronomic effectiveness of P sources through the use of previous crops or microorganisms is potentially interesting and can become economically feasible in the future. The technique of calcination of phosphate rocks of the type Ca-Al-P (crandallite group) is also investigated with the information in literature. In general the requirement for more research with different sources of P is emphasized in greenhouse and field conditions.

Keywords: Sources of P.

## 2.1 Introdução

Em diversas áreas dos trópicos a população e, conseqüentemente, a demanda por alimentos, estão aumentando rapidamente, levando à crescente necessidade de produção das culturas. Porém, a maior parte dos solos das regiões tropicais tem baixos níveis de fertilidade, freqüentemente causados pelos baixos níveis de fósforo (P) disponível, dentre outros fatores (SILVA; RESENDE; CINTRA, 2001; SANCHEZ, 2002; LANA et al., 2004; VAN DER EIJK; JANSSEN; OENEMA, 2006).

O fósforo (P) é de fundamental importância à vida, incluindo humanos que dependem desse para uma vida saudável e produtiva, e é essencial à produção das culturas, não havendo substituto para o P na natureza (USGS, 2005; SHU et al., 2006).

É estimado que existam 7 000 milhões de toneladas de  $P_2O_5$  contidos em rochas fosfáticas remanescentes em reservas que poderiam ser economicamente mineradas. O consumo mundial anual de P é de 40 milhões de toneladas (SHU et al., 2006) e é previsto que a demanda aumentará em 1,5% ao ano (STEEN, 1998). De acordo com estimativas da Associação Européia de Produção de Fertilizantes (2000), as reservas mundiais de fósforo podem ser esgotadas no período de 100 a 250 anos.

As reservas nacionais atingem 2,3 bilhões de toneladas, contendo 222 milhões de toneladas de  $P_2O_5$ , distribuídas, principalmente, nos estados de Minas Gerais, Goiás e São Paulo (LOPES, 2003).

É bastante reportado na literatura que a maioria das rochas fosfáticas brasileiras, quando aplicadas diretamente ao solo, têm baixa eficiência agrônômica devido à origem ígnea das mesmas, havendo, portanto, a necessidade de tratamento para aumentar a solubilidade e, conseqüentemente a eficiência (GOEDERT; LOBATO, 1980). Para tal, a técnica mais amplamente utilizada é a solubilização de concentrados apatíticos com ácidos, principalmente

com ácidos sulfúrico e fosfórico, levando à produção dos superfosfatos, muito utilizados na agricultura brasileira (90% dos fosfatos utilizados).

A principal característica desses fertilizantes fosfatados é a elevada solubilidade em água, porém apresentam inconvenientes industriais, como a exigência de enxofre para a acidulação (produto importado) e de concentrados fosfáticos como matéria prima com elevado teor de  $P_2O_5$  e baixo conteúdo de impurezas, levando a grandes perdas na fase de concentração do minério (RIEDER, 1986). Portanto, existe a necessidade do uso racional dos fertilizantes fosfatados na agricultura e para tal se fazem importantes os estudos para avaliar a viabilidade do uso de alternativas ao aproveitamento desses recursos não renováveis, que são as rochas fosfáticas, pois talvez somente dessa maneira seja possível a otimização do uso desse recurso.

Visando contornar esses problemas, algumas opções têm sido sugeridas, como o uso de fontes alternativas de fósforo, tema central desse capítulo. Entende-se por fontes alternativas aquelas de menor solubilidade relativa em água e pode-se exemplificar com o tratamento térmico, a acidulação parcial, a adição de materiais orgânicos às rochas fosfáticas, o emprego de microrganismos, de forma a ampliar a solubilidade dos materiais, acarretando em maior eficiência agrônômica e custo relativo normalmente inferior.

Essa revisão de literatura sobre fontes alternativas de fósforo foi realizada com o intuito de abordar, para cada fonte, o processo de produção, a filosofia de uso e resultados agrônômicos, de modo a inferir sobre situações em que devem ser empregadas e sobre a necessidade de pesquisas a serem desenvolvidas.

## **2.2 Desenvolvimento**

### **2.2.1 A importância do fósforo para as plantas**

O nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) são os três elementos geralmente usados na adubação em maior proporção. A análise das plantas mostra, entretanto, que a quantidade de P nelas contida é muito menor que as correspondentes ao N e ao K, sendo assim a necessidade de P relativamente mais baixa (RAIJ, 1991).

A biosfera apresenta relativamente pouco P na sua composição elementar (0,03% do total de átomos). Na prática agrícola as plantas dispõem de duas fontes de fósforo: o solo e o fertilizante. Nas regiões tropicais e subtropicais, como acontece no Brasil, o P é o elemento cuja

falta no solo mais frequentemente limita a produção, particularmente das culturas anuais. Segundo dados de Malavolta (2006), em 90% das análises de terra feitas no país encontram-se teores baixos de P disponível.

A concentração de P nas plantas varia entre 0,1 e 0,5% e essas absorvem tanto  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  como  $\text{HPO}_4^{2-}$  (ortofosfato) dependendo do pH do solo. As plantas também absorvem compostos orgânicos solúveis de baixo peso molecular (por exemplo, ácido nucléico e fitina), que são produtos da decomposição da matéria orgânica do solo (HAVLIN; BEATON; TISDALE, 2005).

Assim como o nitrogênio, o P está envolvido em muitos processos vitais para o desenvolvimento das plantas. A função mais essencial está no armazenamento e transferência de energia. Os di e trifosfatos de adenosina (ADP e ATP) agem como “moedas de energia” dentro das plantas. Quando moléculas fosfáticas tanto do ADP como do ATP se quebram, uma grande quantidade de energia é liberada. A energia proveniente da fotossíntese e do metabolismo de carboidratos é estocada em compostos fosfáticos para subsequente uso nos processos vegetativos e reprodutivos. Como resultado, a deficiência de P está associada com a restrição do crescimento e desenvolvimento das plantas (GRANT et al., 2001).

O fósforo é um elemento essencial nos ácidos desoxi (DNA) e ribonucléicos (RNA), que contêm o código genético das plantas para produção de proteínas e outros compostos essenciais para estruturação das plantas, produção de sementes e transferência genética (RICHARDS; JOHNSTON, 2001).

Vale também ressaltar a importância desse nutriente no crescimento do sistema radicular, ampliando a área de exploração das raízes no solo e, conseqüentemente, a eficiência de absorção de nutrientes e água pelas plantas (BAHL; PARISCHA, 1998).

### **2.2.2 A necessidade de adubação fosfatada**

A produtividade das culturas depende, dentre outros fatores, do adequado suprimento de nutrientes, sendo o fornecimento de P via adubação uma prática essencial nos solos brasileiros (SANCHEZ, 2002; BEDIN et al., 2003). A seguir são apresentados alguns exemplos de resposta de plantas à adubação fosfatada, sendo referentes às culturas *Stylosanthes*, milho, alface, coentro e feijão-vagem.

Haque, Lupwayi e Ssali (1999) avaliaram a eficiência agrônômica de diversas fontes de P na cultura do *Stylosanthes*, na dose de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de P e testemunha. Concluíram que na ausência

da adubação fosfatada a produção de matéria seca foi inferior a  $3,0 \text{ t ha}^{-1}$ , sendo incrementada em  $1,8 \text{ t ha}^{-1}$  quando o fósforo foi aplicado.

Com o objetivo de estudar os efeitos de doses de fertilizante fosfatado em adubação de manutenção Prado, Fernandes e Roque (2001) conduziram um experimento em Latossolo Vermelho Escuro na região do Triângulo Mineiro com a cultura do milho. A fonte de P utilizada foi o superfosfato triplo e as doses aplicadas foram de 0; 45,0; 67,5; 90,0; 112,5 e  $135,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Verificou-se que o uso de doses crescentes de P aumentou a produção de grãos de milho, onde a maior dose de P proporcionou a maior produção de grãos ( $7,25 \text{ t ha}^{-1}$ ), com aumento de  $4,21 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos em relação à testemunha.

Lana et al. (2004) avaliando a resposta da cultura da alface a fontes de fósforo observaram que na ausência de P obtiveram-se as menores produções de matéria fresca, matéria seca e diâmetro de plantas, bem como todas as demais variáveis de crescimento. Os dados estão apresentados na tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 – Peso médio de matéria fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea e diâmetro (DPA) de plantas de alface, em função de diferentes fontes de fósforo. Adaptado de Lana et al. (2004)

Tratamentos	MFPA (g planta <sup>-1</sup> )	MSPA (g planta <sup>-1</sup> )	DPA (cm)
Fosmag	123,8 a	19,7 a	22,7 a
Superfosfato triplo	100,3 b	16,9 b	21,4 ab
Superfosfato simples	94,7 c	15,0 b	20,9 b
Termofosfato magnésiano	85,6 d	14,7 b	19,9 bc
Fosfato de Arad	54,1 e	10,6 c	16,8 c
Testemunha (sem aplicação de P)	38,1 f	8,8 c	13,7 d

Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Observa-se no trabalho de Lana et al. (2004) que quando foi aplicada a fonte de P (superfosfato triplo) na dose equivalente a  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , as produções de matéria fresca e seca foram 2,6 e 1,9 vezes superiores, respectivamente, aquelas obtidas no tratamento testemunha, indicando elevada resposta da cultura à fósforo.

Oliveira et al. (2004) analisaram o rendimento da cultura do coentro em função de doses de P aplicadas. Os tratamentos foram constituídos pelas doses de 0, 50, 100, 150 e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . De acordo com os resultados, a altura máxima das plantas (63 cm) e o rendimento máximo estimado de massa verde ( $51 \text{ t ha}^{-1}$ ) foram obtidos, respectivamente, com as doses de  $93 \text{ kg ha}^{-1}$  e

112 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A dose de máxima eficiência econômica foi de 110 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, cuja aplicação proporcionou produtividade de 50,6 t ha<sup>-1</sup>, significando incremento de 15,1 t ha<sup>-1</sup> na produção de massa verde em relação à testemunha.

Em experimento realizado por Oliveira et al. (2005) avaliou-se a resposta do feijão-vagem a doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em um solo arenoso no estado da Paraíba. As doses fornecidas foram de 0, 100, 200, 300 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e a fonte utilizada foi o superfosfato simples. A produção de vagens atingiu valor máximo de 30,1 t ha<sup>-1</sup> na dose de 252 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. O ganho previsto devido apenas à adubação fosfatada, calculado pelo aumento da produção de vagens, foi de 11,9 t ha<sup>-1</sup>, indicando a viabilidade econômica do emprego de P no cultivo dessa cultura.

A grande maioria dos solos submetidos ao clima tropical contém baixo teor de fósforo total e muito baixo teor de fósforo disponível às plantas. A deficiência desse nutriente nos solos tropicais é intensa devido ao baixo pH desses solos e à presença de grandes proporções de argila sesquioxídica, o que aumenta muito a adsorção de fosfatos e a formação de precipitados com ferro e alumínio, reduzindo a disponibilidade de P às plantas (SANCHEZ; SALINAS, 1981; CARDOSO; KUYPER, 2006). De acordo com Sanches e Uehara (1980) os principais fatores que afetam a fixação de P são a mineralogia da fração argila, o conteúdo de argila, o conteúdo de colóides amorfos, o conteúdo de alumínio trocável, o conteúdo de matéria orgânica e o potencial de oxirredução do solo.

Como consequência, doses elevadas de fertilizantes fosfatados são necessárias para que o teor de fósforo disponível se mantenha em níveis adequados ao desenvolvimento das plantas (BARROW, 1978; GOEDERT; LOBATO, 1984).

A necessidade de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, os elevados custos desta prática, e o fato dos jazimentos fosfáticos dos quais são produzidos estes fertilizantes se constituírem em recurso natural relativamente escasso no Brasil, não renovável, sem sucedâneo e indispensável à agricultura, levam à busca de maior eficiência agrônômica do seu uso (LOPES; GOEDERT, 1987; BAHL; PARISHA, 1998).

Sabe-se que as características de solubilidade das fontes de P são de grande importância em relação à sua eficiência: os fosfatos de maior solubilidade, sendo mais prontamente disponíveis, favoreceriam a absorção e o aproveitamento do nutriente, principalmente pelas culturas de ciclo curto (rápido crescimento). No entanto, essa rápida liberação do P pode também favorecer o processo de adsorção e precipitação das formas solúveis pelos componentes do solo,

originando compostos fosfatados de baixa solubilidade e indisponibilizando o nutriente às plantas, sendo tal fenômeno tanto mais expressivo quanto mais argiloso for o solo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Dessa maneira, os fertilizantes de menor solubilidade, ao disponibilizarem mais lentamente o P, poderiam minimizar os processos de fixação e proporcionar maior eficiência de utilização do nutriente pelas culturas ao longo do tempo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Lopes et al. (2003) fazem uma comparação da evolução do perfil de consumo de fertilizantes fosfatados na agricultura brasileira em 1990 e depois em 2000, o que permite a observação de alguns pontos interessantes. Em 1990, o uso de fosfatos naturais para aplicação direta no solo representava menos de 3% do total de  $P_2O_5$  consumido na agricultura brasileira, sendo a quase totalidade na forma de fosfatos naturais nacionais de baixa reatividade. Em 2000 esse percentual aumentou para 4,2%, sendo praticamente todo na forma de fosfatos naturais reativos importados. Embora o percentual de consumo de  $P_2O_5$  na forma de superfosfato simples se mantivesse em torno de 30% do total de  $P_2O_5$  consumido na agricultura brasileira em 1990 e 2000, em valores absolutos houve aumento sensível nesse período, passando de 371 mil para 810 mil toneladas de  $P_2O_5$ .

Alguns estudos têm mostrado um quadro positivo para o futuro crescimento do consumo de fertilizantes fosfatados no Brasil até o ano de 2010. As perspectivas são de que o Brasil estará produzindo 80,3% e 81,6% do consumo esperado de rocha fosfática e ácido fosfórico, respectivamente (REIS, 2002).

No mesmo estudo realizado por Reis (2002), em relação às perspectivas de consumo aparente de  $P_2O_5$  para todo o Brasil, os dados mostram um aumento de 30% para o período de 2000 a 2010, passando de 2,59 para 3,37 milhões de toneladas, com aumento considerável na participação da produção nacional. Para viabilizar esse processo, o autor estima a necessidade de grandes investimentos para extração, beneficiamento e solubilização de rochas fosfáticas. Os dados mostram ainda que o aumento de consumo será mais acentuado nas regiões norte-nordeste e centro-oeste do que nas regiões sudeste e sul do Brasil.

De acordo com Lana et al. (2004), a baixa eficiência das adubações fosfatadas evidencia a necessidade de novos métodos de adubação no que diz respeito a fontes, épocas de aplicação e localização do adubo.

Assim, há necessidade de priorizar trabalhos de pesquisa com a finalidade de aumentar a eficiência de utilização de P pelas plantas, com o objetivo maior de aumentar a vida útil das jazidas de rochas fosfáticas em exploração e as que venham a ser exploradas no futuro. Por motivos estratégicos deve-se dar prioridade à continuidade de pesquisas no Brasil, à busca de novas reservas e recursos de rochas fosfáticas no país e, inclusive, de métodos que possam tornar factível a exploração de depósitos que hoje são considerados inadequados para a exploração.

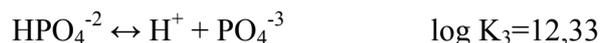
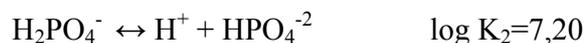
Nesse contexto, provavelmente deveria ser aberto espaço na legislação vigente para a produção de outros fertilizantes fosfatados alternativos que, pelas características de certas rochas, atualmente não atendem às especificações mínimas para fabricação de fertilizantes fosfatados convencionais (LOPES et al., 2003).

### 2.2.3 Reação do fósforo nos solos agricultáveis

O fato do fósforo ser o nutriente aplicado em maiores quantidades em adubação no Brasil está relacionado com o baixo teor de P na maioria dos solos brasileiros e, também, com a forte tendência do P aplicado ao solo reagir com componentes do mesmo, adsorvendo aos colóides (adsorção) ou formando compostos de baixa solubilidade (precipitação) com outros íons presentes no complexo de troca (fixação do fósforo) (BEDIN et al., 2003).

Então, a quantidade de P total nos solos tem pouca ou nenhuma relação com a disponibilidade de P às plantas (HAVLIN; BEATON; TISDALE, 2005). De acordo com Gikonyo et al. (2006), a maioria dos solos submetidos ao clima tropical (aproximadamente 23% - 10<sup>9</sup> ha) pode fixar grandes quantidades de P aplicado.

As formas de P na solução do solo dependem diretamente da acidez da mesma, conforme as reações de dissociação do H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (LINDSAY, 1979; RAIJ, 1991):



Considerando que a maioria dos solos agricultáveis brasileiros apresenta pH na faixa de 3 a 6, a forma predominante é de íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Em geral, esses íons são considerados mais disponíveis para os vegetais (MALAVOLTA, 1985).

A precipitação em solos ácidos ocorre com íons alumínio (Al) ou ferro (Fe) presentes na solução e, no caso de solos alcalinos com íons cálcio (Ca). A grande maioria dos solos tropicais é

caracterizada pelo elevado grau de intemperismo, pela remoção de bases por lixiviação e pela presença de óxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Esses óxi-hidróxidos têm a propriedade de reter diversos tipos de ânions, preferencialmente os íons fosfatos (BEDIN et al., 2003).

Assim, no caso de solos ácidos, a calagem prévia, ao promover a neutralização do Al e de grande parte do Fe, reduz a fixação do fosfato via precipitação com Fe e Al (BORGGAARD et al., 1990). Por outro lado, o uso excessivo de calcário promoveria, a pH acima de 7,0, novo aumento da fixação, via precipitação do fosfato com cálcio. Portanto, a proporção relativa dos compostos inorgânicos de fósforo com ferro, alumínio e cálcio, é condicionada pelo pH e também pelo tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila (NOVAIS; SMYTH, 1999).

De acordo com Lopes (1984), a adsorção dos fosfatos ocorre através de ligação covalente, de alta energia, fazendo com que a fixação de P tenha grande relevância no manejo da fertilidade do solo, visando maior eficiência de uso de fertilizantes fosfatados.

Fosfatos de elevada solubilidade em água adicionados ao solo como fertilizantes dissolvem-se, passando rapidamente para a solução do solo. Devido à baixa solubilidade dos compostos de P formados no solo e às interações com os colóides, grande parte do elemento pode passar para a fase sólida, onde ficará em parte como fosfato lábil, passando gradativamente a fosfato não lábil. O fosfato lábil pode redissolver-se, caso haja abaixamento do teor em solução, para manutenção do equilíbrio (RAIJ, 1991). Em outras palavras, fosfatos solúveis adicionados ao solo apresentam a sua eficiência diminuída ao longo do tempo (GHOSAL et al., 2003).

Assim, compreender as relações e interações das variadas formas desse nutriente nos solos e os numerosos fatores que influenciam sua disponibilidade é essencial para o manejo eficiente de fósforo (HAVLIN; BEATON; TISDALE, 2005).

#### **2.2.4 Fontes tradicionalmente empregadas**

As fontes de fósforo podem ser divididas basicamente em solúveis, pouco solúveis e insolúveis e as mais utilizadas, tradicionalmente empregadas na agricultura (90%), são os fosfatos solúveis em água (MOREIRA et al., 1997; LANA et al., 2004).

O maior emprego das fontes solúveis ocorre, principalmente, por sua elevada quantidade de P considerada disponível às plantas e pelo menor custo por unidade de P presente nestes

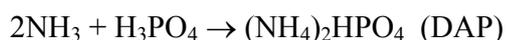
produtos, considerando-se o transporte, o manuseio e o armazenamento (PROCHNOW; ALCARDE; CHIEN, 2003).

Os fosfatos solúveis em água mais comumente utilizados são o superfosfato simples (SPS), o superfosfato triplo (SPT) e os fosfatos de amônio (monoamônico – MAP e diamônico – DAP) e são amplamente utilizados como fonte padrão de fósforo em experimentos que avaliam a eficiência agrônômica relativa de fontes de P (BOLAN; WHITE; HEDLEY, 1990).

O superfosfato simples é obtido do tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico concentrado, portanto, uma mistura de fosfato monocálcico com gesso. Assim, uma fosfatagem corretiva com SPS, indiretamente, promove gessagem parcial ou total, dependendo do tipo de solo. Contém em torno de 18% de  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio mais água (CNA + água), dos quais cerca de 90% é solúvel em água. Em adição, apresenta cerca de 12% de enxofre e 26% de CaO. Podem ser citadas como principais vantagens desse produto: (i) fornece, além do P, cálcio e enxofre; (ii) há formação do gesso agrícola como resíduo, que pode corrigir áreas sódicas e melhorar o ambiente radicular em profundidade; e (iii) apresenta elevada solubilidade em água (VITTI; WIT; FERNANDES, 2003).

O tratamento da rocha fosfática com elevada quantidade de ácido sulfúrico resulta na produção de ácido fosfórico e gesso. O gesso acumula como subproduto, enquanto que o ácido fosfórico é separado por filtração para ser usado na produção do superfosfato triplo (SPT) e de fosfatos de amônio (MAP e DAP). Pela separação do gesso e acidulação de novo lote de rocha com ácido fosfórico, obtém-se um fertilizante (SPT) com aproximadamente 41% de  $P_2O_5$  solúvel em CNA + água, dos quais cerca de 90% é solúvel em água. Apesar da vantagem do elevado teor de fósforo, o SPT apresenta as desvantagens em relação ao SPS de um menor teor de CaO (15%) e de não conter enxofre (VITTI; WIT; FERNANDES, 2003).

Os fosfatos de amônio são fertilizantes obtidos pela reação da amônia com ácido fosfórico, produzindo o monoamônio fosfato (MAP) ou o diamônio fosfato (DAP), conforme as reações a seguir: (GOEDERT; SOUSA, 1984)



O MAP apresenta, aproximadamente, 11% de N e 48% de  $P_2O_5$  solúvel em CNA + água, enquanto que o DAP apresenta, aproximadamente, 18% de N e 45% de  $P_2O_5$  solúvel em CNA + água. Ambos têm tido seu consumo muito aumentado nos últimos anos, tanto para uso como

fertilizante simples quanto para preparar formulados sólidos de alta concentração (ANGHINONI; BARBER, 1980). Também, por serem quase completamente solúveis em água, são usados para preparo de fertilizantes fluidos e em fertirrigação (APTHORP et al., 1987; SENGIK; KIEHL, 1995).

Bolland e Bowden (1982) relatam que as fontes de fósforo de elevada solubilidade em água são mais eficientes a curto prazo. Porém, é bastante reportado na literatura que essas fontes fosfatadas de elevada solubilidade, quando adicionadas aos solos tropicais ácidos, de alta capacidade de fixação de P, são rapidamente convertidas a formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (BOLLAND, 1985; KORNDÖRFER; LARA-CABEZAS; HOROWITZ, 1999; GHOSAL et al., 2003; PROCHNOW et al., 2003).

Baseando-se em estudos realizados por Bolland (1986) e Bolland, Weatherley e Gilkes (1998), que comparam o efeito residual dos superfosfatos com outras fontes de lenta liberação de P, pode-se inferir que a elevada eficiência inicial do superfosfato é seguida por um decréscimo marcante em eficiência ao longo do tempo. Utilizando fontes de menor solubilidade, a eficiência inicial foi inferior, porém o declínio em eficiência com o passar do tempo foi menos significativo.

Esse fato da indisponibilização de P liberado ocorrer de forma mais intensa no caso das fontes de elevada solubilidade em comparação às de baixa que, ao liberarem o nutriente de forma mais lenta, minimizam o processo de fixação, também foi observado em estudo realizado por Resende et al. (2006).

Com relação ao processo de produção das fontes de P de elevada solubilidade em água, sabe-se que o processo químico de solubilização de rochas fosfáticas com ácido sulfúrico ou fosfórico aumenta o custo do fertilizante, tornando seu uso limitado à parte dos agricultores, levando à necessidade de alternativas para o uso desse nutriente (BOLAN; WHITE; HEDLEY, 1990; REDDY et al., 1999; ZAPATA; ROY, 2004; STAMFORD et al., 2007).

A rota sulfúrica, única seguida no Brasil para a produção de ácido fosfórico, apresenta alguns problemas, tais como: formação de grande volume de rejeitos, o fosfogesso (5 a 6 toneladas para cada tonelada de ácido fosfórico produzido), associado à drenagem ácida e, por vezes, à radioatividade, o que limita sua utilização. Além disso, a rota sulfúrica não permite a recuperação de produtos de valor comercial, como os elementos terras-raras. Portanto, rotas e metodologias alternativas à rota sulfúrica vêm sendo estudadas visando a escolha daquela que

ofereça maiores vantagens técnicas, econômicas e ambientais no contexto brasileiro, vislumbrando a criação de novos pólos industriais de fertilizantes fosfatados (CETEM, 2000).

A utilização de ácido nítrico e do ácido clorídrico para o tratamento de rochas fosfáticas vem sendo estudada com o objetivo de encontrar rotas alternativas de produção de fertilizantes com o mínimo de poluição, associadas à possibilidade de aproveitamento dos produtos rejeitados e de recuperação de subprodutos de valor comercial (BANDEIRA et al., 2002).

Outra limitação dos processos de solubilização completa das RFs é a exigência de concentrados fosfáticos como matéria-prima com elevado teor de  $P_2O_5$  e baixo conteúdo de impurezas, o que tem levado à perdas de até 40% do  $P_2O_5$  extraído nas jazidas na fase de concentração do minério (GOEDERT; REIN; SOUZA, 1990).

Os materiais utilizados ultimamente para produção dos fertilizantes fosfatados solúveis são de baixa qualidade e contêm elevados níveis de impurezas que, geralmente são insolúveis em água e, sua composição depende da constituição mineralógica da fonte e do processo utilizado para produzir o fertilizante fosfatado.

Devido ao incremento no teor de impurezas dos compostos fosfatados e, conseqüentemente à redução na eficiência agrônômica dos mesmos, estudos foram conduzidos no sentido de avaliar a eficiência do SPS contendo concentrações variáveis de impurezas como ferro e alumínio.

Prochnow et al. (2003) comentam em seu trabalho que uma possibilidade para melhorar a disponibilidade de P de fertilizantes contendo altas concentrações de compostos com ferro e alumínio (insolúveis em água, porém solúveis em citrato neutro de amônio) seria a aplicação desses em solos inundados, situação em que há redução de  $Fe^{+3}$  para  $Fe^{+2}$ , o que pode resultar em aumento de disponibilidade de P. Nesse sentido, realizaram estudo para obter informações sobre a eficiência de fontes de SPS contendo diferentes concentrações de impurezas com Fe e Al na cultura do arroz de sequeiro e inundado e para tal usaram materiais provenientes de Araxá. Os dados mostraram que o superfosfato simples obtido com a rocha fosfática de Araxá (46% de P solúvel em água + citrato em relação ao total) apresentou 91% de eficiência em relação à fonte de elevada solubilidade em água (fosfato monocálcico) em aumentar a produção de matéria seca de arroz de sequeiro, sugerindo que esses materiais não deveriam ser descartados baseado somente no critério de baixa solubilidade em água, conforme estipulado pela legislação que requer de 90 a 93% do P solúvel em água.

Prochnow, Alcarde e Chien (2003) relatam que a maior parte das pesquisas tem se concentrado na purificação da rocha fosfórica e na opinião desses deve-se investir de forma decisiva em pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos, já que as indústrias brasileiras têm optado por processos industriais onerosos para eliminar os contaminantes.

Para contornar o problema dos custos dos fosfatos solúveis obtidos pelos processos convencionais de solubilização, além da questão de fixação do nutriente pelo solo, vem sendo proposto o uso de fontes alternativas de fósforo, como os fosfatos parcialmente acidulados, os fosfatos de fusão (termofosfatos) e os fosfatos naturais (GOEDERT; REIN; SOUZA, 1990; REDDY et al., 1999; KLIEMANN; LIMA, 2001; LANA et al., 2004), dentre outras.

Assim, sugere-se que fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água sejam usadas em solos com baixa à moderada capacidade de fixação de P, em culturas de ciclo curto e solos com pH elevado, ou seja, que foram corrigidos pela calagem. Em solos ácidos, que fixam grandes quantidades de P, a aplicação de fontes de P menos solúveis pode ser mais eficiente e econômica em relação às fontes de elevada solubilidade. A mistura desses dois tipos de fontes de fósforo pode ser uma alternativa viável.

### **2.2.5 Fontes alternativas**

Nos últimos 30 anos têm ocorrido importantes avanços relacionados ao desenvolvimento e tendências que começam a reformular os padrões tradicionais de produção e uso de fertilizantes fosfatados. A aplicação direta de fontes de baixa solubilidade em água tem surgido como uma alternativa de menor custo, o que favoreceu o aumento do seu uso no Brasil (BRASIL, 2004).

O fator principal que leva a isto é o início de um declínio mundial na qualidade das matérias-primas fosfatadas, não somente nos principais depósitos, mas também nos mais recentemente descobertos, resultando em materiais de composição mineral muito divergentes. Isso terá impacto nos processos químicos de tecnologias existentes, desenvolvidas inicialmente para a formação de concentrados fosfáticos de elevada qualidade (KHASAWNEH; SAMLE; KAMPRATH, 1980). Apesar da antiga citação, essa informação ainda é válida nos tempos atuais.

Outro fator apontado é a expansão do mercado agrícola tropical e subtropical que, para tal requer novas formulações de fosfatos, diferindo em propriedades relacionadas à solubilidade e composição dos fertilizantes químicos amplamente produzidos. A abrupta elevação dos custos

tanto de energia como de matéria-prima fosfatada levam à necessidade de estudos para mudanças na tecnologia química corrente baseada na indústria mundial de fertilizantes fosfatados.

É reportado que durante muito tempo a adubação fosfatada se realizou quase exclusivamente com fontes de elevada solubilidade em água, porém, além dos fatores acima citados, a redução de subsídios à agricultura e o aumento dos preços dos fertilizantes têm servido de estímulo aos pesquisadores para avaliar alternativas mais econômicas para suprir a demanda de P durante os cultivos (HAQUE; LUPWAYI; SSALI, 1999; FERNANDÉZ; MEZA, 2004).

### **2.2.5.1 Termofosfatos**

Os termofosfatos são definidos como fertilizantes resultantes do tratamento térmico de rochas fosfatadas, com ou sem adição de outros materiais (silicato de magnésio), visando converter o fósforo de modo que se torne disponível às plantas. No caso do termofosfato magnésiano é necessária a adição de componentes magnesianos e silícicos (VITTI; WIT; FERNANDES, 2003). Esses componentes, como é o caso dos silicatos, concorrem para diminuir a fixação do fósforo solubilizado por competirem com os fosfatos pelos sítios de adsorção, contribuindo para a manutenção do P adsorvido em sua forma lábil.

Existem diversos trabalhos na literatura que relatam incremento na disponibilização de fósforo proporcionado pela adição de silício e a seguir serão citados dois exemplos.

Carvalho et al. (2001) avaliaram a interação silício-fósforo em um Cambissolo com a cultura do eucalipto. Verificaram que o maior valor de P extraído ( $28,0 \text{ mg vaso}^{-1}$ ) foi obtido com a dose de  $140 \text{ mg dm}^{-3}$  de silício (Si). O valor de P no tratamento controle (sem adição de Si) foi de  $24,3 \text{ mg vaso}^{-1}$ , representando, portanto, um ganho de 15,3% em P com a adição de silício. O autor sugere que uma fração do Si aplicado migrou para as superfícies oxídicas da fração argila, onde foi adsorvida. Esta adsorção provocou dessorção de parte do P, que foi absorvida pelas plantas.

Prado e Fernandes (2001) avaliaram o efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo em um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. A maioria das pesquisas desenvolvidas no Brasil com a escória analisou apenas seu efeito corretivo e como fonte de alguns nutrientes presentes na sua constituição, entretanto são escassos os trabalhos que avaliaram o efeito destes resíduos no P disponível do solo. Tratando-se de um

produto conhecido como corretivo de acidez, torna-se difícil afirmar se os ganhos na redução da adsorção do P são uma ocorrência apenas do incremento do pH ou do efeito do silicato em deslocar ou saturar os sítios de adsorção de P do solo. Assim, conduziram experimento com a finalidade de isolar o efeito do pH do efeito do silicato. A aplicação da escória de siderurgia incrementou os níveis de P disponível do solo de maneira linear, ao passo que a aplicação do calcário não apresentou uma relação significativa, tanto aos 12 como aos 24 meses após a aplicação.

A maior eficiência da escória sobre o calcário no aumento do P disponível do solo deve-se mais ao efeito do silicato contido na escória, exercendo uma competição dos ânions de silicato com o P pelos mesmos sítios de adsorção (SMYTH; SANCHEZ, 1980), do que ao efeito do pH propriamente dito. Por outro lado, é citado que a eficiência do silicato em aumentar o P disponível do solo não está na capacidade de troca dos ânions silicato pelo fosfato no solo e, sim, na saturação ou bloqueio destes sítios de adsorção de P pelo ânion silicato.

Com relação à fabricação dos termofosfatos, na primeira etapa prepara-se a rocha fosfatada e os materiais contendo silício e magnésio, os quais são fundidos em fornos, com temperatura de operação entre 1400°C e 1500°C. Tanto a alimentação do forno quanto sua descarga podem ser operações contínuas e intermitentes. Ao sair do forno, o material é resfriado imediatamente com jatos de água, formando, nessa operação, grãos inferiores a 2 mm, de aspecto vítreo e de coloração, em geral, enegrecida. Esses grãos são então separados da água e levados a um pátio para drenagem do excesso de umidade (produto semi-acabado), seguindo para o secador rotativo e o moinho de bolas. Posteriormente, o produto é ensacado, adicionando-se ou não micronutrientes e enxofre. O produto apresenta teor de  $P_2O_5$  total em torno de 16% (VITTI; WIT; FERNANDES, 2003), sendo praticamente todo solúvel em ácido cítrico (KLIEMANN; LIMA, 2001).

A elevada solubilidade dos termofosfatos em citrato neutro de amônio e em ácido cítrico a 2% pode ser explicada pelo aquecimento e destruição da rede cristalina do mineral, incrementando a solubilidade do material e, conseqüentemente, aumentando a quantidade de fósforo assimilável às plantas (BÜLL; LACERDA; NAKAGAWA, 1997; FERNANDÉZ; NOGUERA, 2003).

Com a finalidade de produzir um novo fertilizante fosfatado com os fosfatos naturais de maior uso na Venezuela (Riecito e Monte Fresco), Fernández e Noguera (2003) submeteram

esses fosfatos à temperatura de cerca de 900°C por 3, 5 e 7 horas e observaram, conforme demonstrado na tabela 2, incremento significativo no teor de P total e solúvel em citrato neutro de amônio nos três períodos de tempo avaliados. Os autores justificam os resultados relatando que elevadas temperaturas rompem a estrutura cristalina da rocha fosfática ocasionando perda de flúor e outras impurezas na forma gasosa, aumentando, portanto, o teor de P total e solúvel dos materiais. As diferenças de resultados entre as rochas fosfáticas provavelmente se devem à RF de Monte Fresco ser um material com estrutura cristalina de maior rigidez em relação à RF de Riecito e, portanto, apresentar menor solubilidade relativa.

Tabela 2 – Teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total e solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) contidos na rocha fosfática (RF) de Riecito e Monte Fresco, em estado natural e calcinadas a 900° C durante 3, 5 e 7 horas. Adaptado de Fernadéz e Noguera (2003)

Tempo de calcinação (horas)	RF de Riecito		RF de Monte Fresco	
	Total (%)	CNA (%)	Total (%)	CNA (%)
0	28,8 c	1,5 b	22,3 b	0,4 a
3	30,0 b	2,4 b	25,2 a	0,5 a
5	30,9 ab	3,7 a	26,1 a	0,8 a
7	31,2 a	4,0 a	26,1 a	1,7 a

Médias seguidas por letras distintas na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Avaliando a resposta do milho a fontes de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do cerrado, Resende et al. (2006) utilizaram como tratamentos superfosfato triplo (SPT), termofosfato magnésiano (TM), fosfato reativo de Arad (FR), fosfato natural de Araxá (FA) e testemunha. Concluíram que nas duas primeiras safras, as fontes de maior solubilidade (SPT e TM) ocasionaram as maiores produções. O FA, com solubilidade limitada, apresentou baixa eficiência ao longo dos cultivos. Na média dos cultivos, o uso das fontes SPT, TM, FR e FA correspondeu, respectivamente, à recuperação de cerca de 49, 54, 46 e 33% do P fornecido.

Stefanutti, Malavolta e Muraoka (1995) avaliaram a recuperação do P residual de um termofosfato magnésiano (TM) com diferentes granulometrias, comparando-o com o superfosfato simples (SPS) granulado, em amostras de solo de textura média argilosa, por sete cultivos. Inferiram que com o uso do termofosfato na forma de pó houve recuperação de 15,9 mg vaso<sup>-1</sup> de P na média dos 7 cultivos, apresentando efeito residual semelhante ao do SPS granulado (18,2 mg

vaso<sup>-1</sup> de P) e a granulometria mais grosseira do termofosfato resultou em menor recuperação do fósforo residual (13,9 mg vaso<sup>-1</sup> de P).

Os adubos fosfatados solúveis são aplicados na forma de grânulos e, ao entrarem em contato com o solo, ocorre uma rápida absorção de umidade, ocasionando a dissolução do P. No caso dos termofosfatos, o processo de dissolução do fósforo é mais lento, entretanto, com o tempo, o fósforo residual poderá equiparar ou mesmo até superar os resultados da fonte solúvel em água (STEFANUTTI; MALAVOLTA; MURAOKA, 1995).

Visando avaliar as alterações químicas decorrentes da aplicação de termofosfatos em solo típico da região dos cerrados e a eficiência agronômica desses fertilizantes, Büll, Lacerda e Nakagawa (1997) conduziram um experimento em que os tratamentos foram: controle (sem fósforo), superfosfato triplo (SPT), termofosfato em pó (TMpó), e granular (TMgr), aplicados na dose de 200 mg dm<sup>-3</sup> de P. Os índices de eficiência agronômica para TMpó e TMgr foram de, respectivamente, 100% e 22%, em relação à fonte de elevada solubilidade em água (SPT), mostrando que o produto com maior tamanho de partículas foi menos eficaz tanto no acúmulo de fósforo pela planta como na produção total de biomassa.

Nakayama et al. (1998) realizaram experimento em casa-de-vegetação com plantas de arroz para verificar se os fosfatos de baixa solubilidade em água, porém solúveis em ácido cítrico a 2%, apresentavam a mesma eficiência agronômica que os fosfatos solúveis em água. Para tal utilizaram como fontes: superfosfato simples (padrão), multifosfato magnésiano (Fosmag - MFM), termofosfato magnésiano (TM), fosfato de Gafsa (FG) e fosfato de Araxá (FA), nas doses de 0, 50 e 150 mg dm<sup>-3</sup> de P. Para a dose de 50 mg dm<sup>-3</sup> de P obtiveram os seguintes índices de eficiência agronômica (IEA) em relação ao SPS (IEA = 100%): 106%, 98%, 95% e 16%, respectivamente. Para a dose de 150 mg dm<sup>-3</sup> de P, os IEA foram de 86%, 82%, 84% e 22% para as fontes, na mesma ordem anterior, sendo as três primeiras estatisticamente iguais ao SPS, demonstrando que os fosfatos solúveis em ácido cítrico apresentaram eficiência agronômica similar à do fosfato solúvel em água.

Assim, considerando-se a diversidade de solos, climas e culturas abrangidas pela agropecuária brasileira, são perfeitamente válidos a produção e o consumo de várias formas de fertilizantes fosfatados. Sabe-se que para culturas de ciclo curto (anuais e bianuais) a eficiência dos fertilizantes fosfatados é proporcional à parcela do fósforo solúvel no mesmo. Por outro lado,

não é menos verdade que existe efeito residual, ou seja, a parcela não solúvel (ou parte dela) que acaba sendo aproveitada a longo prazo por culturas perenes ou por cultivos sucessivos.

Além disso, o Brasil é altamente dependente do mercado internacional no que se refere ao enxofre, matéria-prima para a produção de ácido sulfúrico utilizado no processo tradicional, a via úmida, uma vez que importa 85% de suas necessidades, tornando-se vulnerável em relação a este material considerado estratégico (CARVALHO et al., 2000).

Carvalho et al. (2000) realizaram um trabalho que visou estabelecer os custos completos dos recursos energéticos mais factíveis para a geração de energia elétrica para a produção de termofosfato na região do Médio Paranapanema, dentro do contexto do Planejamento Integrado de Recursos. Buscaram dessa maneira, as melhores opções de suprimento energético para uma determinada necessidade industrial, atentando-se para o desenvolvimento sustentável da região. Foi um trabalho preliminar, que buscou contribuir com a discussão acerca de uma nova forma de planejamento energético onde os custos sócio-ambientais fossem efetivamente considerados. Registraram por fim que a maior restrição feita ao aumento da produção de termofosfatos no Brasil é o alto consumo de energia elétrica pelos processos produtivos, sendo um dos principais fatores a ser considerado na viabilização técnico-econômica desse produto.

Assim, a utilização dos termofosfatos, principalmente, em solos que apresentam condições adversas ao emprego dos fertilizantes tradicionais, como elevada capacidade de fixação de fósforo, pode ser uma opção agrônômica, o que justifica o desenvolvimento de mais pesquisas e incentivos para sua possível produção em maior escala no país.

#### **2.2.5.2 Fosfatos naturais**

Fosfatos naturais são concentrados apatíticos obtidos a partir de minérios fosfáticos ocorrentes em jazimentos localizados, os quais podem ou não, passar por processos físicos de concentração, como lavagem e/ou flotação, para separá-los dos outros minerais com os quais estão misturados na jazida (IFDC/UNIDO, 1979).

A denominação fosfato natural ou rocha fosfática cobre ampla variação nesses tipos de minérios, em composição, em textura e em origem geológica (GREMILION; Mc CLELLAN, 1980; KAMINSKI, 1983).

Os depósitos de rocha fosfática são divididos em três classes, de acordo com a composição mineral: fosfato de ferro-alumínio (Fe-Al-P), fosfato de cálcio-ferro-alumínio (Ca-

Fe-Al-P) e fosfatos de cálcio (Ca-P). Estas três classes constituem uma seqüência natural de intemperização dos depósitos de rocha fosfática, na qual as formas estáveis de fosfatos de ferro-alumínio representam o estágio mais avançado de intemperismo e o fosfato de cálcio representa a rocha matriz (KHASAWNEH; SAMPLE; KAMPRATH, 1980).

A classe de maior importância econômica é a dos fosfatos de cálcio devido ao uso industrial para os mais variados fins, mas especialmente na indústria de fertilizantes, enquanto que as demais classes têm escassa possibilidade de utilização. Estudos têm sido conduzidos no sentido de avaliar e aumentar a eficiência agrônômica dessas outras classes como fontes de P (KLIEMANN; LIMA, 2001).

Normalmente, as jazidas de minério de fosfato possuem teores de  $P_2O_5$  inferiores aos necessários para seu processamento industrial (LEHR, 1980). Por isso, precisam ser beneficiados, separando-os dos minerais com os quais estão misturados para obter o concentrado fosfático, dito fosfato natural concentrado, com teor de P adequado ao processo industrial subsequente, que resultará no fertilizante (GREMILION; Mc CLELLAN, 1980).

Os depósitos de fosfatos de origem ígnea ou magmática são, geralmente, pobres em sílica, possuem textura simples e contém rochas associadas do tipo carbonatitos e ultrabásicas, em que a fluorapatita é o principal mineral fosfático, como Jacupiranga e Catalão no Brasil e Tennessee nos EUA. Estes fosfatos representam aproximadamente, 17% das reservas mundiais e cerca de 50% das reservas brasileiras (HAMMOND, 1997; KAMINSKI, 1990).

Os fosfatos de origem sedimentar possuem geologia complexa e variada, podendo ser detríticos, precipitados químicos ou conter quantidades significativas de apatita fóssil (orgânica). Os minerais predominantes são apatitas com alto grau de substituições isomórficas de fosfato e carbonato, e são encontradas em áreas desérticas ou de clima seco. São muitas vezes identificados como francolitas e fosforitas (KLIEMANN; LIMA, 2001).

Esses fosfatos são oferecidos no mercado de fertilizantes como fosfatos naturais reativos que permitem sua utilização diretamente na agricultura, como os fosfatos naturais da Carolina do Norte – EUA, de Gafsa – Tunísia, de Sechura – Peru e de Arad – Israel (HAMMOND, 1997).

A legislação brasileira determina, para fosfatos naturais reativos, o teor mínimo de  $P_2O_5$  total de 27% , 28% de Ca e 30% do  $P_2O_5$  total solúvel em ácido cítrico a 2% (BRASIL, 2004).

Os fosfatos de origem metamórfica representam uma categoria intermediária entre as rochas sedimentares e ígneas e apresentam outros minerais misturados entre si (KLIEMANN; LIMA, 2001).

Para que um composto fosfático seja um fertilizante eficiente, um dos requerimentos é que seja solúvel na solução do solo. A amplitude de dissolução da rocha fosfática é dependente tanto das características da rocha de origem como do solo em que será aplicado (HUGHES; GILKES, 1986; GOVERE; CHIEN; FOX, 2004; HE et al., 2005; YAMPRACHA et al., 2006), além das plantas a serem cultivadas.

A aplicação direta de rochas fosfáticas no solo como fonte de P é uma prática que tem sido empregada com variados graus de popularidade ao longo dos anos. Numerosos experimentos têm sido conduzidos nos últimos anos para determinar as melhores condições de solo e da cultura para o seu uso (KHASAWNEH; DOLL, 1978; ZAPATA; ZAHARAH, 2002; CASANOVA; SALAS; TORO, 2002).

A eficiência agronômica de uma rocha fosfática é diretamente relacionada com a reatividade química da apatita, que é determinada pelo grau de substituição isomórfica de fosfato por carbonato no cristal da apatita (LEHR; Mc CLELLAN, 1972; CHIEN; BLACK, 1976; KHASAWNEH; DOLL, 1978; ANDERSON; KUSSOW; COREY, 1985).

É reportado que alguns fosfatos naturais apresentam eficiência agronômica semelhante à das fontes solúveis, o que pode ser compensador pelo menor custo por unidade do nutriente. A seguir será apresentado um exemplo.

Korndörfer, Lara-Cabezas e Horowitz (1999) avaliaram o comportamento agronômico de fosfatos naturais (Arad-FNA, Marrocos-FNM e Gafsa-FNG) quanto à produção de grãos de milho comparando com o superfosfato triplo (SFT). Concluíram que a capacidade do FNA, FNM e FNG em fornecer P para o milho foi de 60, 80 e 97%, respectivamente, quando comparados com o SFT. Os autores sugerem que com o passar do tempo os fosfatos naturais melhorem ainda mais sua eficiência em relação à fonte de alta solubilidade, devido ao maior efeito residual.

A lei da ação das massas indica que a dissolução da RF é favorecida pelas condições do solo que mantêm baixas concentrações de Ca e P na solução do solo. Em estudo de incubação, Mackay e Syers (1986) verificaram que menores níveis de Ca trocável associados com reduzida saturação por Ca na capacidade de troca de cátions do solo, que leva a menores concentrações de

Ca na solução do solo, estão relacionados com incrementos na taxa de dissolução das rochas fosfáticas.

Estudos no campo e observações de laboratório mostram que condições do solo como baixo pH, teores baixos de P e Ca trocáveis na solução, alta capacidade de fixação de P, clima úmido e ameno, culturas com extenso sistema radicular e longos períodos de crescimento são interessantes para obter elevada eficiência agronômica da RF, já que contribuem à dissolução das mesmas (HAMMOND; CHIEN; EASTERWOOD, 1986; APHORP; HEDLEY; TILLMAN, 1987; KANABO; GILKES, 1987; AKINTOKUN; ADETUNJI; AKINTOKUN, 2003).

Em experimentos de longa duração, realizados em Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, com gramíneas forrageiras tolerantes à acidez, têm-se obtido resultados razoáveis de eficiência agronômica com vários fosfatos naturais brasileiros, da ordem de 45% em relação à fonte de elevada solubilidade em água (GOEDERT; LOBATO, 1984; SANZONOWICKZ; LOBATO; GOEDERT, 1987; SOUSA et al., 1987).

Com relação à calagem, prática comumente recomendada para solos ácidos, essa aumenta o pH do solo e, também reduz a toxidez por alumínio, eleva o teor de cálcio trocável do solo, prejudicando, portanto, a dissolução da RF. Assim, as doses de calcário devem ser cuidadosamente recomendadas para reduzir a toxidez por Al e simultaneamente evitar efeitos adversos na dissolução das RFs em solos ácidos, caso se deseje a utilização destes materiais (LOPES; GUILHERME, 1992).

Um outro fator que interfere na eficiência agronômica das rochas fosfáticas é o sistema radicular da espécie cultivada. A absorção de P pelas plantas é proporcional à densidade das raízes; assim, o incremento da área superficial da massa radicular aumenta a condição da planta em acessar e absorver o P do solo (HOPPO; ELLIOT; REUTER, 1999).

Moreira, Malavolta e Moraes (2002) avaliando a eficiência de fontes e doses de P na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo, concluíram que com a seqüência de cortes, a produção de matéria seca obtida com os fosfatos naturais reativos tende a equiparar-se à das fontes mais solúveis. Atribuíram esses resultados à ampliação do sistema radicular das culturas ao longo dos cultivos, possibilitando maior exploração das raízes e, conseqüentemente, maior absorção de fósforo pelas culturas.

Em relação ao tamanho das partículas dos fosfatos naturais, é citado na literatura que a eficiência agronômica dessas fontes aumenta com a redução do tamanho das partículas. Horowitz

e Meurer (2003), avaliando a eficiência de dois fosfatos naturais (Gafsa e Gantour Black) farelados em função do tamanho de partícula, notaram que essas fontes apresentaram maior índice de eficiência agronômica quando foram moídos finamente (partículas < 0,074 mm), e que à medida que o tamanho das partículas foi aumentado, a eficiência foi reduzida.

É comentado por Savant e Chien (1990) que para obter maior eficiência de uso pelas culturas, a RF deve ser aplicada a lanço em área total e incorporada ao solo para maximizar o contato das partículas da RF com o solo.

Portanto, generalizadamente sugere-se o uso dos fosfatos naturais em solos que apresentem baixo a médio pH e baixos teores de cálcio e fósforo em solução e elevada capacidade de fixação de P, e em culturas de ciclo longo e com extenso sistema radicular, de modo a ampliar a eficiência agronômica dessa fonte.

A consulta à literatura permite verificar que existem diversas áreas ainda a serem estudadas para intensificar o uso de fosfatos naturais, entre elas: (i) avaliação da eficiência agronômica dessas fontes conforme variação de características do solo como teor de matéria orgânica, pH, teor de argila; (ii) quantificação da eficiência de diversas fontes para culturas tolerantes ao baixo nível de P no solo; (iii) avaliação dos efeitos da época de aplicação em relação ao calcário, localização e tamanho de grânulos; e (iv) avaliação do efeito residual dessas fontes em relação aos fosfatos de elevada solubilidade em água.

Finalmente, existe a necessidade de desenvolvimento da modelagem adequada para utilização de rochas fosfáticas pelas culturas, baseado em ensaios agronômicos em condições de campo, objetivando analisar a viabilidade econômica do uso de RF, em relação a fontes de elevada solubilidade em água, por produtores agrícolas. Esse assunto é tema desse trabalho e é abordado mais amplamente no capítulo 4.

### **2.2.5.3 Fosfatos naturais parcialmente acidulados (FNPA's)**

Em muitos países em desenvolvimento, diversos impostos têm restringido a importação de fertilizantes e isso tem criado uma situação em que os fertilizantes não estão disponíveis a parte dos produtores ou são muito caros. A alternativa em depender de fertilizantes importados é explorar os recursos nativos, como as rochas fosfáticas, de modo a ampliar a eficiência dessas. Uma possibilidade é a acidulação parcial (HAMMOND; CHIEN; MOKWUNYE, 1986), em um custo inferior aquele necessário à produção dos fertilizantes convencionais, totalmente acidulados

(BATIONO et al., 1990). Para tal, é necessário que as rochas fosfáticas não apresentem quantidades substanciais de óxidos de ferro e alumínio como impurezas em sua composição (MENON; CHIEN, 1990), para que não formem compostos fosfatados de baixa solubilidade durante o processo de acidulação.

Os fosfatos naturais parcialmente acidulados (FNPA) são obtidos reagindo rochas fosfáticas, geralmente, com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) ou ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), em quantidades inferiores àquelas necessárias para produção do superfosfato simples ou triplo, respectivamente.

O uso de FNPAs tem sido difundido na Europa e América do Sul desde Nordengen (1957), o pioneiro a reportar seu uso (RAJAN; MARWAHA, 1993; ZAPATA; ROY, 2004).

A acidulação parcial das rochas fosfáticas pode ser um econômico meio de incrementar a eficiência agrônômica de materiais de baixa solubilidade, impróprios para serem aplicados diretamente aos solos (MENON; CHIEN, 1990; DI et al., 1994). Por essa razão, extensos estudos foram e têm sido conduzidos em diversas regiões do mundo avaliando a eficiência de uso desses fertilizantes, entretanto, são escassos estudos envolvendo rochas fosfáticas nacionais.

É relatado que os FNPAs são mais baratos em relação aos fosfatos totalmente acidulados devido à menor utilização de energia e reagentes por unidade de P no produto e, freqüentemente, são mais concentrados que o superfosfato simples (HAMMOND; CHIEN; MOKWUNYE, 1986; CHIEN; MENON, 1995).

O nível de acidulação da rocha fosfática é usualmente expresso em termos de porcentagem. Por exemplo, quando 1/5 do ácido sulfúrico necessário para produzir superfosfato a partir de determinada RF é usado, o produto é denominado FNPA 20%  $H_2SO_4$ . O termo FNPA 20%  $H_3PO_4$  refere-se ao produto utilizando 1/5 do ácido fosfórico requerido para produção do superfosfato triplo.

É relatado por Zapata e Roy (2004) que a acidulação parcial com  $H_3PO_4$  resulta em FNPAs contendo maior teor total e solúvel de P em relação à RF não acidulada. A acidulação parcial com  $H_2SO_4$  resulta em decréscimo no teor total de P devido à formação de sulfato de cálcio no produto.

De qualquer modo, o teor de P solúvel em água aumenta com o incremento do grau de acidulação, aumentando a eficiência do FNPA (RAJAN, 1986; GOEDERT; SOUSA, 1986; GOEDERT; REIN; SOUZA, 1990; HAGIN; HARRISON, 1993), porém, é necessário considerar o incremento no custo de produção do fertilizante.

O custo dos FNPAs aumenta com o incremento no grau de acidulação, porém o teor de P do produto não aumenta proporcionalmente, devido à formação de compostos fosfatados insolúveis em água durante o processo de acidulação. Portanto, é desejável produzir um fertilizante com o menor grau de acidulação, de forma a não encarecer muito o produto, mas agronomicamente eficiente (RAJAN, 1986).

Dados de pesquisas sobre a eficiência agrônômica de fosfatos parcialmente acidulados mostram que alguns FNPAs de 40 a 50% de acidulação com  $H_2SO_4$  ou 20 a 30% de acidulação com  $H_3PO_4$  são tão eficientes quanto os fosfatos totalmente acidulados (HAMMOND; CHIEN; MOKWUNYE, 1986; BOLAN et al., 1990; RAJAN; MARWAHA, 1993; CHIEN; MENON, 1995; GHOSAL et al., 2003).

As possíveis causas para a elevada eficiência agrônômica dos FNPAs são: (i) o “priming effect” proporcionado pelo fosfato monocálcico (FMC) contido no FNPA e a maior exploração do sistema radicular por P; e (ii) a dissolução do FMC levando à formação de ácido fosfórico e, conseqüentemente, a reação desse ácido com parte da RF que ainda não havia reagido (acidulação secundária) (RAJAN, 1986; RAJAN; WATKINSON, 1992).

Hammond, Chien e Mokwunye (1986) descrevem a possibilidade de obtenção de FNPA a partir de RF de baixa solubilidade, desde que não haja presença de elevados teores de óxidos de ferro e alumínio na estrutura, o que levaria a reversão do P solúvel a formas insolúveis durante o processo de acidulação com  $H_2SO_4$ , ou seja, a precipitação de compostos do tipo Fe-Al-P.

Vale ressaltar que as opiniões quanto à eficiência dos FNPAs são bastante contraditórias (STEPHEN, 1985; STEPHEN; CONDRON, 1986; RESSELER; WERNER, 1989; DI et al., 1994). De acordo com Stephen e Condron (1986), essas diferenças nas eficiências agrônômicas relativas observadas se devem às distintas combinações de fatores dos fertilizantes, solos e plantas a que são submetidos os experimentos.

Seguem apresentados alguns trabalhos que avaliam a eficiência agrônômica de fosfatos naturais parcialmente acidulados.

Em ensaio realizado por Haque, Lupwayi e Ssali (1999) foi verificado que a rocha fosfática de Minjingu, aplicada *in natura* ou parcialmente acidulada (50% de acidulação), apresenta elevada eficiência (100% e 103%, respectivamente) em relação ao superfosfato triplo em incrementar a produção de *Stylosanthes*, mostrando que para essa rocha fosfática particularmente não há necessidade de acidulação.

Ghosal et al. (2003) avaliaram a eficiência agronômica das rochas fosfáticas de Marrocos (14,8% de P) e de Mussoorie (8,3% de P) *in natura* e de um fosfato natural parcialmente acidulado (13,0% de P) em relação ao superfosfato triplo (21,8% de P e EA = 100%). Foram avaliados os efeitos da aplicação direta das fontes de P bem como os efeitos no decorrer de três anos de cultivo, ou seja, o efeito residual das fontes de P. Na tabela 3 estão apresentados os resultados de eficiência agronômica obtidos nesse experimento. Avaliando o efeito residual dessas fontes observa-se que a acidulação parcial proporcionou maior eficiência ao longo do tempo.

Tabela 3 – Eficiência agronômica relativa (EAR) de fontes de fósforo em função da aplicação direta e do efeito residual proporcionado pelas mesmas. Adaptado de Ghosal et al. (2003)

Tratamentos	Aplicação direta	Efeito Residual
	EAR (%)	
Superfosfato triplo	100	100
RF de Marrocos	54	124
RF de Mussoorie	62	114
Fosfato natural parcialmente acidulado	80	142

Experimentos foram conduzidos por Rajan (1986) usando três tipos de solos para determinar a biodisponibilidade de P a partir da RF da Carolina do Norte *in natura* e tratada com 20 e 50% de  $H_3PO_4$  requerido para acidulação completa. Como planta teste foi utilizado o centeio e como fonte padrão de P foi usado o superfosfato triplo. Os dados de produção de matéria seca e de P absorvido mostraram que a eficiência das RFs parcialmente aciduladas foi significativamente superior à RF aplicada *in natura* e ao SFT.

Chien e Hammond (1989) realizaram um estudo em casa-de-vegetação para comparar o efeito da capacidade de fixação de P do solo na eficiência agronômica relativa do fosfato de rocha de Huila (Colômbia), parcial e completamente acidulado. Os solos apresentavam capacidade de fixação de P entre 5,6% e 56,1%. Os resultados mostraram que a eficiência relativa do FNPA em aumentar a produção de matéria seca e absorção de P aumentou linearmente com o incremento na capacidade de fixação de P do solo, sendo superior à da fonte solúvel em água em solos de elevada capacidade de fixação de P. Vale salientar que o aumento na fixação reduziu a

disponibilidade de P tanto do FNPA como da fonte solúvel, entretanto a redução foi menos significativa na fonte de menor solubilidade.

Stephen e Condrón (1986) relatam que o teor de fosfato monocálcico no FNPA é inferior aquele do superfosfato, assim há menor quantidade de P solúvel para ser fixada em um solo com alta capacidade de fixação do nutriente.

Para Zapata e Roy (2004), idealmente, a acidulação parcial de determinada RF deveria ser considerada após o desenvolvimento de estudos que variam o tipo, a quantidade e concentração do ácido, a temperatura, o tipo de processo de mistura com o objetivo de solubilizar a maior quantidade de RF por um dado nível de adição de ácido.

Segundo Bolland, Clarke e Yeates (1995), os fatores que ampliam a eficiência dos FNPA são média a elevada reatividade das rochas fosfáticas e partículas de pequeno tamanho da RF, solos ácidos, de elevada capacidade de fixação de fósforo, cultivos de ciclo longo e, rotação de culturas.

Porém, devido à relativa escassez de dados, principalmente em condições brasileiras, e à multiplicidade de fatores que interferem na determinação do grau de eficiência relativa de uma rocha fosfática parcialmente acidulada, definir conclusões é extremamente difícil, mas admite-se que a acidulação parcial pode ser uma maneira de incrementar a eficiência das rochas fosfáticas em determinadas condições (STEPHEN; CONDRON, 1986), desde que essas não apresentem elevados teores de ferro e alumínio em sua composição (impurezas catiônicas), o que interferiria na eficiência agrônômica dessas fontes devido à formação de compostos insolúveis desses elementos com o fósforo durante o processo de acidulação.

#### **2.2.5.4 Mistura de fontes de diferentes solubilidades**

Fertilizantes que são similares em composição química aos FNPA podem ser preparados pela compactação a seco sob pressão ou através de mistura da rocha fosfática com fertilizantes fosfatados solúveis, como superfosfatos simples, triplo, fosfatos mono e diamônicos (MENON; CHIEN, 1990; RAJAN; MARWAHA, 1993; CHIEN; MENON, 1995).

Esses procedimentos são realizados com custo inferior ao necessário para produzir os fertilizantes convencionais, totalmente acidulados, a partir da mesma rocha, porém o teor de P solúvel em água dos produtos dependerá da relação entre RF e fertilizante fosfatado solúvel em água utilizada.

A tecnologia de compactação ou mistura dos materiais fosfáticos de distintas solubilidades oferece a vantagem de utilizar rochas fosfáticas que não são adequadas para a acidulação parcial direta com  $H_2SO_4$  devido à presença em sua composição de elevado teor de óxidos de ferro e alumínio, pois não há utilização do ácido sulfúrico nesta técnica, o que desfavorece a formação dos compostos fosfatados insolúveis.

Existem evidências de que a eficiência das RFs, mesmo daquelas de baixa reatividade, é aumentada após compactação ou mistura com fósforo solúvel em água (CHIEN et al., 1987; MENON; CHIEN; GADALLA, 1991; PROCHNOW et al., 2004). É reportado por Zapata e Roy (2004) que, nessas condições, a compactação ou mistura da RF com fertilizantes fosfatados solúveis em água com relação de P de aproximadamente 50:50 pode levar ao uso agrônomico e economicamente viável das RFs marginais em países em desenvolvimento.

Abaixo seguem alguns resultados de trabalhos realizados com rochas fosfáticas compactadas ou misturadas com fontes solúveis de P e, assim como foi observado para os FNPAs, estudos em condições brasileiras são escassos.

Em trabalho realizado por Chien et al. (1987) foi utilizada combinação da RF da Carolina do Norte finamente moída com superfosfato triplo e pôde ser observado, através de dados de produção de matéria seca de plantas de milho, que a disponibilidade de P da RF era incrementada com o aumento nas proporções da fonte solúvel adicionada à mistura.

O mesmo foi observado por Chien, Menon e Billingham (1996) avaliando a eficiência agrônômica da RF da Flórida Central aplicada junto a uma fonte solúvel de P. Obtiveram 86% de EA da RF compactada com superfosfato triplo, versus 37% de EA obtida com aplicação da RF somente, em relação ao superfosfato triplo. Ressaltam que a EAR das RFs é maior para culturas que apresentam baixa demanda por P, como leguminosas, opostamente aos cereais, como milho por exemplo.

A capacidade de algumas espécies de acidificarem a rizosfera é um outro mecanismo sugerido por Bekele et al. (1983) para a diferença entre as plantas em utilizar o P proveniente das rochas fosfáticas. Essas espécies são capazes de acidificar a rizosfera devido à padrão de absorção alcalino, ou seja, espécies exigentes em nutrientes alcalinos. Isso pode ser exemplificado por plantas que absorvem elevadas taxas de cálcio, o que gera: (i) redução do pH da rizosfera; (ii) troca de equilíbrios devido à lei da ação das massas, favorecendo, portanto, a absorção de P por essas espécies.

Menon e Chien (1990) avaliaram a eficiência agronômica de uma RF de baixa (Capinota/Bolívia –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 8,8\%$ ) e outra de média reatividade (Huila/Colômbia -  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 2,3\%$ ), compactadas com superfosfato triplo, de forma que 50% do P total da mistura fosse solúvel em água. As eficiências desses materiais como fontes de P foram comparadas com FNPAs produzidos a partir das mesmas com 50% de acidulação com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Os resultados mostraram que a eficiência da RF de Huila acidulada com 50% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  foi a mesma dessa rocha compactada com SPT em incrementar a produção de milho e ambas foram tão eficientes quanto o SPT. Por outro lado, a RF de Capinota acidulada com 50% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  foi menos eficiente que a mesma rocha compactada com SPT, a qual foi tão eficiente quanto o SPT. Com esses resultados confirma-se que rochas fosfáticas de baixa reatividade, contendo elevado teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$  não são adequadas à acidulação, sendo a técnica de compactação uma alternativa para incrementar a eficiência dessas fontes fosfatadas.

Prochnow et al. (2004) conduziram um estudo com o objetivo de investigar sobre a eficiência agronômica potencial de fontes de P de baixa solubilidade produzidas a partir da RF de Patos de Minas (PM), a qual não é recomendada para aplicação direta nos solos devida à baixa reatividade e para produção comercial de fertilizantes fosfatados devido aos elevados teores de ferro, alumínio e silício em sua constituição. Para tal, realizaram experimento em casa de vegetação e os tratamentos foram: (i) superfosfato simples de elevada solubilidade (SSP); (ii) RF de PM; (iii) “low grade superphosphate” – produzido a partir da RF de PM, portanto de baixa solubilidade (LG SSP); (iv) RF de PM e SSP compactados na razão de P de 50:50 [RF + SSP(C)]; e (v) RF de PM e SSP misturados na razão de P de 50:50 [RF + SSP(M)]. As fontes de P foram aplicadas em solo com pH igual a 5,3 nas doses de 0, 10, 25, 50 e 100  $\text{mg kg}^{-1}$  de P.

Os autores verificaram que a EAR da RF de PM foi muito baixa devido à baixa reatividade dessa fonte. Não houve diferença significativa entre SSP, RF+SSP(C) e LG SSP em termos de produção de matéria seca, entretanto o tratamento RF+SSP(M) foi menos eficiente. Isso foi atribuído à eficiência reduzida do SSP em pó no tratamento RF+SSP(M) devido à maior fixação de P comparado com o SSP compactado em RF+SSP(C). Obtiveram as seguintes EARs para produção de matéria seca: SSP = 100%, RF de PM = 30%, LG SSP = 99%, RF+SSP(C) = 95%, RF+SSP(M) = 86%. Realizando algumas comparações observaram que o P absorvido da RF no tratamento RF+SSP(C) foi muito maior em relação à aplicação da RF somente na mesma dose RF-P aplicada. Por exemplo, o P absorvido na dose de 25  $\text{mg kg}^{-1}$  de P aumentou de 1 mg

kg<sup>-1</sup> de P com a aplicação da RF somente para aproximadamente 9 mg kg<sup>-1</sup> de P com a RF aplicada em RF+SSP(C). Portanto, foi possível inferir que o SSP estimulou a eficiência da RF na mistura.

Villanueva et al. (2006) estudaram o comportamento do eucalipto em relação à capacidade de usar fósforo proveniente de fontes com distintas solubilidades em água. Esse estudo foi realizado em casa-de-vegetação, com amostras de um LVA e empregando-se o método isotópico com <sup>32</sup>P. As fontes de P usadas foram superfosfato triplo (SFT), RF de Patos de Minas (PM) e a mistura de SFT+PM. As doses utilizadas foram: SFT = 100 mg dm<sup>-3</sup> de P; PM = 400 mg dm<sup>-3</sup> de P e SFT+RF = 50 mg dm<sup>-3</sup> de P como SFT mais 400 mg dm<sup>-3</sup> de P como RF de PM. A eficiência das fontes em termos de rendimento de matéria seca e P absorvido encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 – Eficiência agrônômica relativa (EAR) para produção de matéria seca da parte aérea e P absorvido por plantas de eucalipto obtida a partir de fontes de P. Adaptado de Villanueva et al. (2006)

Espécies	MSPA		P absorvido	
	RF	(SFT+RF)	RF	(SFT+RF)
EAR (%)				
<i>E. urophylla</i>	19	96	35	148
<i>E. grandis</i>	27	105	50	167
Híbrido	27	102	39	137

Portanto, através dos resultados é possível verificar grandes incrementos na produção de MSPA e no P absorvido influenciados pelo SFT na mistura da RF com essa fonte. Assim, de acordo com Villanueva et al. (2006), para solos com baixa disponibilidade de P ou elevada capacidade de fixação de P, a aplicação em área total de RF associada com adição localizada de fonte de P solúvel em água é recomendada para melhorar e manter a produtividade do eucalipto. Justificam os resultados através das seguintes causas: (i) a solubilização parcial da RF através da acidez do SFT e (ii) o “priming effect” do SFT aumentando o desenvolvimento do sistema radicular, possibilitando, portanto, o uso mais eficiente do P proveniente da RF pelas plantas do que seria com o uso da RF somente.

Dessa maneira, verifica-se que grande parte dos produtos parcialmente acidulados, seja por ácidos, pela compactação ou pela mistura com fertilizantes fosfatados solúveis em água,

contendo, portanto, componentes fosfáticos solúveis em água e também de lenta liberação de P, têm sido tão eficientes quanto os superfosfatos logo a partir da aplicação. Assim, existe a necessidade de avaliar se os componentes fosfatados de lenta liberação de P contidos nesse tipo de fertilizante oferecem vantagens a longo prazo sobre o uso dos superfosfatos (MACKAY; WEWALA, 1990).

Em relação ao efeito residual, Mackay e Wewala (1990) desenvolveram um estudo por dois anos comparando as fontes de P de menor solubilidade (RF reativa da Carolina do Norte compactada com superfosfato simples; RF reativa da Carolina do Norte parcialmente acidulada; fosfato natural da Carolina do Norte) com superfosfato simples no cultivo de trevo. Concluíram que no primeiro ano, tanto a acidulação como a compactação estimulou muito mais significativamente o desenvolvimento das plantas em relação à aplicação do fosfato natural. Entretanto, no segundo ano de cultivo observaram maior efeito residual do fosfato natural em relação ao superfosfato simples e às fontes parcialmente aciduladas.

No caso da RF apresentar a mesma eficiência agrônômica quando aplicada compactada com fonte solúvel de P ou parcialmente acidulada, a escolha pela modificação dependerá de considerações econômicas, ou seja, de qual processo é menos oneroso, a compactação ou a acidulação. Segundo Zapata e Roy (2004), a acidulação parcial e granulação química são processos mais dispendiosos do que a compactação, que não envolve nenhum processo de secagem, reduzindo o preço e a energia necessários ao processo de produção.

De acordo com Bolan, White e Hedley (1990), para países em desenvolvimento, a adição de superfosfatos às rochas fosfáticas nativas pode ser uma alternativa para prover uma fonte solúvel de P no estabelecimento das culturas.

Assim, sugere-se a técnica de compactação ou mistura de rochas fosfáticas com fonte fosfatada de elevada solubilidade em água como uma alternativa para incrementar a eficiência agrônômica de materiais fosfáticos de baixa reatividade, impróprios ao processo tradicional de acidulação por conter elevados teores de ferro e alumínio, que poderão ser agronomicamente eficientes em solos com elevada capacidade de fixação de P, como é o caso da maioria dos solos brasileiros.

### **2.2.5.5 Solubilização de rocha fosfática por materiais orgânicos**

No decorrer da pedogênese e em ecossistemas com baixa disponibilidade de fósforo, as comunidades de microrganismos e de plantas devem ser capazes de absorver o P a partir de baixas concentrações na solução do solo. Desse modo, é necessário o desenvolvimento de mecanismos próprios e de naturezas diversas, como a solubilização de minerais contendo fosfatos, a produção e liberação de ácidos orgânicos, a formação de substâncias complexantes ligadas ao P ou de ânions que possam competir pelos sítios de adsorção (AE et al., 1990), além de outros mecanismos, de forma a disponibilizar maior quantidade do nutriente às culturas.

Gikonyo et al. (2006) relatam que várias técnicas têm sido utilizadas no intuito de aumentar a eficiência das RFs e uma bastante atrativa inclui integrar RF com materiais orgânicos. Estes autores citam trabalhos que têm mostrado estímulo na dissolução da RF com adição de material orgânico, incluindo Gaur e Ostwall (1972), Dhliwayo (1999) e Ikerra, Mnkeni e Singh (2004).

Experimentos foram realizados por Minhoni, Cardoso e Eira (1991) incubando amostras de solo adicionadas de apatita e cinco diferentes fontes de carbono (glicose, bagaço de cana, palha de soja e de milho e vinhaça) e determinando periodicamente o teor de P solúvel e o pH. Verificaram que, enquanto em ausência de uma fonte de carbono não houve qualquer liberação significativa de fósforo solúvel, em presença de glicose como fonte de carbono houve a melhor resposta, seguindo-se a vinhaça. Já os materiais de lenta biodegradação, como o bagaço de cana e palhas, praticamente não apresentaram efeitos significativos durante o tempo de duração do experimento.

Gikonyo et al. (2006) avaliaram o efeito residual de diferentes fertilizantes fosfatados, dentre eles o superfosfato triplo, RF de Gafsa (elevada reatividade) e RF de Christmas Island (baixa reatividade), com e sem adição de resíduo orgânico em pastagens. Verificaram que para a RF de baixa reatividade houve incremento significativo na produção de massa seca quando foi adicionado resíduo orgânico a essa fonte em relação a aplicação da RF somente, sugerindo efeito do material orgânico na solubilização do P contido na RF. Entretanto, ressaltam a necessidade de continuidade de estudos com diversos tipos de rocha fosfática, solo, cultura e manejo.

De acordo com Kpombrekou-A e Tabatabai (2003), os ácidos orgânicos desempenham uma importante função na dissolução, transporte e concentração de elementos na superfície da Terra, assim como na formação de solos e na nutrição de plantas, devido à formação de

complexos solúveis com elementos provenientes das rochas e minerais. Nesse sentido, esses pesquisadores realizaram um trabalho com ácidos orgânicos de baixo peso molecular (AOBPM) de livre ocorrência, ou seja, produzidos no solo como metabólitos microbianos ou exsudatos de plantas, originados de células vivas ou mortas, representando uma nova perspectiva nas pesquisas sobre rochas fosfáticas. Estudaram a liberação de P de diversas rochas fosfáticas, de distintas reatividades, usando alguns AOBPM, além do ácido sulfúrico. Concluíram que os ácidos orgânicos foram eficientes na liberação de P das rochas fosfáticas de baixa ( $65,5 \text{ mmol kg}^{-1}$  de RF) e média ( $55,1 \text{ mmol kg}^{-1}$  de RF) reatividades e ineficientes para aquelas de alta reatividade ( $11,1 \text{ mmol kg}^{-1}$  de RF).

Esses resultados concordam com pesquisa realizada por Harold e Tabatabai (2006), em que as liberações de P foram positivamente correlacionadas com a presença de ácidos orgânicos, sugerindo serem promissores em relação à obtenção de incrementos nos teores de P biodisponíveis em solos adubados com rochas fosfáticas.

Os ácidos orgânicos de baixo peso molecular contêm vários grupos funcionais que podem exercer função significativa na dissolução de rochas fosfáticas (BOLAN et al., 1994; HAROLD; TABATABAI, 2006). A eficiência desses ácidos em aumentar a disponibilidade de P às plantas depende do valor de pH do solo, do tipo de ânion orgânico e da persistência destes ânions no solo (KIRK, 1999; SINGH; AMBERGER, 1995).

Bhatti, Comeford e Johnston (1998) observaram que a adsorção do fosfato do solo diminui na presença de oxalato e matéria orgânica. Lopes Hernandez, Siegert e Rodriguez (1986), trabalhando com amostras de solos tropicais, concluíram que malato e oxalato eram mais rapidamente adsorvidos pelo solo do que o fosfato, e que esses ânions, quando presentes na rizosfera, podem aumentar a disponibilidade de P para as plantas. A redução na adsorção de P pelo solo, segundo esses autores, depende da forma como são adicionados o fosfato e os ânions orgânicos. A máxima redução na adsorção de P pelo solo ocorreu quando o fosfato e o ânion orgânico foram aplicados juntos, ou quando a adição do ânion orgânico precedeu à do fosfato.

Os efeitos da aplicação de rochas fosfáticas tratadas com ácidos orgânicos (AO) no desenvolvimento e absorção de nutrientes pela grama italiana foram avaliados por Sagoe et al. (1998) em experimento conduzido em casa-de-vegetação. As RFs foram provenientes de diversos países (China, EUA, Jordânia, Sri Lanka, Togo e Tanzânia) e foram tratadas com 1 M de ácido tartárico ou oxálico na proporção de  $2,5 \text{ mL g}^{-1}$  de RF. As RFs tratadas com ácido orgânico

continham de 12 a 31% de P solúvel em água e foram aplicadas na dose de 50 mg vaso<sup>-1</sup> de P. Foram incluídos mais dois tratamentos: as RFs não tratadas e superfosfato simples. Observaram que a recuperação de P das RFs tratadas com AO, calculada por unidade aplicada de P solúvel em água, foi de 52 a 111%, comparado com 52% obtido a partir do SPS. Verificaram também que as RFs tratadas com AO aumentaram significativamente tanto a produção de matéria seca como a absorção de P em relação à testemunha e às RFs aplicadas sem tratamento e a quantidade de P solúvel em água foi positivamente correlacionada com essas duas variáveis. Esses incrementos em matéria seca e absorção de P não foram equivalentes ao SPS, porém essas RFs tratadas com AO supriram adequadamente o P inicial requerido pelas plantas.

Wolthoorn et al. (2004), em estudos de laboratório, confirmam que em um meio onde estão presentes compostos orgânicos,  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{PO}_4^{-3}$ , os ácidos orgânicos presentes atraem os íons  $\text{Fe}^{2+}$ , preferencialmente aos íons  $\text{PO}_4^{-3}$ , deixando esses livres para serem absorvidos pelas plantas.

Em estudo realizado por Reddy et al. (1999) foi avaliado o uso integrado de esterco e fertilizante fosfatado (diamôniofosfato - DAP) no sistema soja-trigo. Verificaram efeito interativo da aplicação de esterco e fertilizante fosfatado na produtividade de ambas culturas. A seguir estão apresentados alguns resultados desse trabalho.

Tabela 5 – Efeito do uso integrado de esterco e fertilizante fosfatado (DAP) na produtividade das culturas da soja e trigo. Adaptado de Reddy et al. (1999)

<b>Esterco (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>P (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Soja (t ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Trigo (t ha<sup>-1</sup>)</b>
0	0	1,07	1,52
0	44	2,02	3,21
11,2	0	1,91	3,93
11,2	44	2,28	4,48

Reddy et al (1999) concluíram que os incrementos em produção foram maiores quando houve a aplicação integrada de material orgânico e fosfático, em relação à aplicação isolada de cada um desses materiais. Afirmam que essa é uma estratégia promissora para prover o status de fertilidade em P do solo e obter maior produtividade nos Vertissolos de regiões tropicais submetidas ao clima semi-árido.

Guppy et al. (2005) apontam a necessidade de pesquisas focadas nas interações entre o P e o carbono orgânico em solos altamente intemperizados usando matéria orgânica, ácidos

orgânicos de baixo e alto peso molecular, e aplicação de fertilizantes fosfatados em doses adequadas em condições de campo.

São escassas as pesquisas que avaliam a eficiência agrônômica de rochas fosfáticas misturadas a materiais orgânicos, tornando-se difícil a recomendação dessa técnica para ampliar a solubilidade dos compostos fosfatados presentes. Portanto, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos que analisem o desempenho dessas fontes alternativas de fósforo e assim, um dos objetivos dessa tese foi avaliar a eficiência agrônômica de compostos organofosfatados obtidos a partir de exposição de misturas de materiais fosfáticos e orgânicos a reações em equipamento denominado Humifert, tema do capítulo seguinte.

#### **2.2.5.6 Outras fontes alternativas de fósforo**

Outra alternativa bastante reportada é a utilização de microrganismos com possibilidade de promover a solubilização de rochas fosfáticas (ARCAND; SCHNEIDER, 2006; STAMFORD et al. 2007). Por exemplo, espécies de *Acidithiobacillus* reagem com enxofre elementar produzindo ácido sulfúrico, podendo incrementar a disponibilidade de P no solo pela elevação da solubilidade da RF, fornecendo fósforo para o processo de desenvolvimento das plantas.

Uma vez que resultados prévios indicaram que somente a mistura de RF com enxofre elementar não aumentava significativamente a disponibilidade de P, a adição de um componente biológico se faz necessária, levando à denominação do produto final de biofertilizante.

De acordo com Nahas (1999), os efeitos da aplicação de enxofre elementar inoculado com *Acidithiobacillus* na solução do solo necessitam ser avaliados e comparados com aqueles proporcionados pelos fertilizantes fosfatados solúveis e pelos fosfatos naturais, pois o ácido sulfúrico produzido nas reações biológicas pode reduzir o pH do solo, introduzindo ou ampliando problemas relacionados à toxidez por alumínio.

Stamford et al. (2007) conduziram um estudo em amostras de solo ácido para avaliar o efeito de biofertilizantes produzidos a partir da RF de Daoui (Marrocos) e enxofre elementar previamente inoculado com *Acidithiobacillus*. Foram utilizadas doses crescentes de enxofre (de 50 a 200 g de S kg<sup>-1</sup> de RF) no preparo dos biofertilizantes e o efeito desses na produção de matéria seca de plantas de feijão foi comparado com aquele proporcionado pelo superfosfato triplo e pelo fosfato natural de Daoui, fornecidos na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P. Na tabela 6 estão apresentados alguns dados obtidos nesse experimento.

Os resultados da tabela 6 indicaram efeito positivo do enxofre na solubilização do fósforo, e também que os microrganismos são estimulados com a maior disponibilidade de enxofre, refletindo em produção de matéria seca. Com relação ao teor de P no solo, observaram que quando foi adicionada a maior dose de S (200 g de S kg<sup>-1</sup> de RF) e *Acidithiobacillus*, houve o maior teor de P extraído do solo (24,1 mg kg<sup>-1</sup> de P), e na ausência de aplicação de S o teor de P extraído foi 5,7 mg kg<sup>-1</sup> de P. Esses resultados confirmam dados obtidos em ensaios realizados anteriormente pela mesma equipe (STAMFORD et al., 2002; STAMFORD et al., 2003).

Tabela 6 – Efeito dos tratamentos fosfatados na produção de matéria seca (MS) de plantas de feijão. Adaptado de Stamford et al. (2007)

Tratamentos	MS (g planta <sup>-1</sup> )
Controle (sem aplicação de P)	4,70 c
Rocha fosfática	5,53 b
Rocha fosfática + 200 g kg <sup>-1</sup> de S	5,77 ab
Superfosfato triplo	6,30 a
Rocha fosfática + 50 g kg <sup>-1</sup> de S e <i>Acidithiobacillus</i>	6,13 a
Rocha fosfática + 100 g kg <sup>-1</sup> de S e <i>Acidithiobacillus</i>	5,75 ab
Rocha fosfática + 150 g kg <sup>-1</sup> de S e <i>Acidithiobacillus</i>	6,06 a
Rocha fosfática + 200 g kg <sup>-1</sup> de S e <i>Acidithiobacillus</i>	5,97 ab

Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A inoculação dos microrganismos pode ser realizada também através da peletização, porém Santos (2002) observou menores vantagens promovidas pelo processo, já que esse parece reduzir a produção de ácido sulfúrico devido ao limitado “input” de oxigênio e água, essenciais à oxidação do enxofre.

Chen et al. (2006) relatam que a capacidade de alguns microrganismos do solo de converter formas insolúveis de P a formas acessíveis pelas plantas é um fator importante a ser considerado, por promover incrementos nas produções das espécies cultivadas. Assim, realizaram um trabalho isolando e caracterizando 36 estirpes de bactérias solubilizadoras de P originárias de Taiwan Central. A capacidade de solubilização de fosfato mineral de todos os isolados foi testada em meio contendo fosfato tricálcico através da análise do teor de P solúvel após 72 horas de incubação a 30° C. Dentre as estirpes testadas, foram encontradas quatro que ainda não haviam sido identificadas como solubilizadoras de fosfatos após confirmação da capacidade dessas de solubilizar quantidades consideráveis de fosfato tricálcico através da excreção de ácidos orgânicos. Relatam que, devido ao negativo impacto ambiental proveniente do uso

indiscriminado de fertilizantes químicos e ao elevado custo desses, o uso de microrganismos solubilizadores de fosfatos pode ser vantajoso nas práticas de agricultura sustentável.

Absorção de fósforo e produções aumentadas nas plantas adubadas com biofertilizantes, em relação à aplicação exclusiva de fontes de P, indicam, segundo Stamford et al. (2007), que essa técnica apresenta grande potencial como alternativa de menor custo em relação aos fertilizantes de elevada solubilidade.

Em trabalho escrito por Arcand e Schneider (2006) são revisados mecanismos de dissolução das RFs incluindo a produção de prótons e ácidos orgânicos por plantas e microrganismos e relatam serem tecnologias de baixo custo e apropriadas para estimular a solubilização e aumentar a eficiência agrônômica de rochas fosfáticas.

Uma outra técnica utilizada para aumentar a eficiência agrônômica das rochas fosfatadas é a calcinação. Essa técnica tem sido empregada em fosfatos aluminosos e ferro-aluminosos, de reduzida eficiência agrônômica, podendo, portanto, viabilizar a utilização de fosfatos marginais.

Bolland e Bowden (1982) compararam em experimentos de longa duração a eficiência do superfosfato e da RF de Christmas Island (Austrália) calcinada nas temperaturas de 500 e 900° C. Observaram que, apesar da maior eficiência obtida com o superfosfato, essa foi reduzida do primeiro para o segundo ano, opostamente aquela proporcionada pelos produtos calcinados, que tendeu a aumentar a eficiência ao longo do tempo, independentemente da temperatura empregada.

Em ensaios realizados por Hughes e Gilkes (1986) analisaram-se as respostas a diversas fontes de P, dentre elas três rochas fosfatadas calcinadas (RF de Queensland, Calciphos e Phospal, sendo as duas últimas fosfatos de rocha ferro-aluminosos). Concluíram que a RF de Queensland calcinada proporcionou os melhores resultados em termos de eficiência agrônômica, sendo consistente com sua maior solubilidade em relação às demais fontes. A relação  $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$  é determinante na análise da extensão de solubilização de rochas fosfatadas. Esses pesquisadores ressaltam que a quantidade de cada fertilizante solubilizada dependeu também significativamente das características de cada solo em que foi aplicado.

Francisco (2006) em seu estudo utilizou amostras do rejeito da mineração de depósitos fosfáticos de importância nacional contendo fosfatos aluminosos do grupo da crandallita. Esse mineral secundário é considerado impróprio para o processo de acidulação devido à quantidade de alumínio e outras impurezas minerais presentes. O objetivo era avaliar a eficiência agrônômica

desses minerais após tratamento térmico (calcinação). Concluiu: (i) que essa técnica (temperaturas médias de 500° C) aumentou a solubilidade em citrato neutro de amônio e promoveu alteração na estrutura cristalina dos minerais; (ii) a solubilização desses materiais é favorecida em pH do solo próximo à neutralidade; e (iii) que a adição dessas fontes de P ao solo proporcionou resposta significativa na produção de matéria seca, na quantidade de P acumulado e no rendimento de grãos de plantas de arroz de sequeiro e inundado. Assim, a utilização de compostos fosfáticos contendo impurezas catiônicas, indesejáveis ao processo de acidulação, deve então ser avaliada sob condições agronômicas específicas, que maximizem o aproveitamento de fósforo pelas plantas.

Assim, o emprego de microrganismos e das próprias culturas como solubilizadores de rochas fosfáticas parece ser relativamente pouco oneroso e agronomicamente eficiente. Com relação ao procedimento de calcinação, utilizado em fosfatos aluminosos e ferro-aluminosos, de reduzida eficiência agronômica, considera-se uma alternativa para viabilizar a utilização de fosfatos marginais.

### **2.3 Conclusões**

O uso das fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água é recomendado em condições de baixa à moderada capacidade de fixação de P pelo solo, culturas de ciclo curto e solos com pH elevado, ou seja, que foram corrigidos pela calagem. São amplamente utilizados na agricultura por possuírem elevada quantidade de P disponível às plantas e pelo menor custo por unidade de P presente nestes produtos, considerando-se o transporte, o manuseio e o armazenamento.

As fontes alternativas de fósforo como os termofosfatos e os fosfatos naturais podem apresentar maior eficiência agronômica em relação às fontes de P de elevada solubilidade em água em condições de elevada capacidade de fixação, solos ácidos e culturas de ciclo longo, em que o fósforo seria liberado de forma gradativa, ao longo do desenvolvimento da cultura.

Em relação à recomendação de uso de fosfatos naturais parcialmente acidulados, de fosfatos compactados e de solubilização de rochas fosfáticas por materiais orgânicos, sugere-se o desenvolvimento de pesquisas em condições brasileiras, pois são escassos na literatura dados que subsidiem a predição de uso dessas fontes.

De acordo com a revisão realizada pôde ser observado que mecanismos baseados em plantas e microrganismos podem ser tecnologias de baixo custo e apropriadas para estimular a solubilização e aumentar a eficiência agronômica de rochas fosfáticas.

Uma outra técnica proposta para aumentar a eficiência agronômica das rochas fosfatadas é a calcinação, que tem sido empregada em fosfatos aluminosos e ferro-aluminosos, de reduzida eficiência agronômica, podendo, portanto, viabilizar a utilização desses fosfatos marginais.

Entretanto, vale ressaltar que a utilização de determinada fonte de fósforo deve ser baseada tanto na eficiência da fonte em suprir o nutriente às culturas como no custo da mesma.

### Referências

- AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K.; YOSHIHARA, J.; JOHANSEN, C. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian Subcontinent. **Science**, Washington, v. 248, p. 477-480, 1990.
- AKINTOKUN, O.O.; ADETUNJI, M.T.; AKINTOKUN, P.O. Phosphorus availability to soybean from an indigenous phosphate rock sample in soils from southwest Nigeria. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 65, p. 35-41, 2003.
- ANDERSON, D.L.; KUSSOW, W.R.; COREY, R.B. Phosphate rock dissolution in soil: indications from plant growth studies. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 918-925, 1985.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p.1041-1044, 1980.
- APTHORP, J.N.; HEDLEY, M.J.; TILLMAN, R.W. The effect of nitrogen fertilizer form on the plant availability of phosphate from soil, phosphate rock and monocalcium phosphate. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 12, p. 269-283, 1987.
- ARCAND, M.M.; SCHNEIDER, K.D. Plant- and microbial-based mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: a review. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 4, p. 791-807, 2006.
- BAHL, G.S.; PASRICHA, N.S. Efficiency of P utilization by pigeonpea and wheat grown in a rotation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 51, n. 3, p. 225-229, 1998.
- BANDEIRA, L.F.M.; LOUREIRO, F.E.L.; ARAÚJO, R.V.V.; SANTOS, R.L.C. Estudo da lixiviação clorídrica e nítrica de concentrado fosfático. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicação/serie\\_anais](http://www.cetem.gov.br/publicação/serie_anais). 2002>. Acesso em: 13 de dezembro de 2006.

BARROW, N.J. The description of phosphate adsorption curves. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 29, n. 4, p. 447-462, 1978.

BATIONO, A.; CHIEN, S.H.; HENAO, J.; CHRISTIANSON, C.B.; MOKWUNYE, A.U. Agronomic evaluation of two unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to Niger. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1772-1777, 1990.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27. p. 639-646, 2003.

BEKELE, T. An evaluation of plant born factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 75, p. 361-378, 1983.

BHATTI, J.S.; COMEFORD, N.B.; JOHNSTON, C.T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic horizon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1089-1095, 1998.

BOLAN, N.S.; WHITE, R.E.; HEDLEY, M.J. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 30, p. 297-313, 1990.

BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J.; HARRISON, R.; BRAITHWAITE, A.C. Influence of manufacturing variables on characteristics and the agronomic value of partially acidulated phosphate fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 26, p. 119-138, 1990.

BOLAN, N.S.; NAIDU, R.; MAHIMAIRAJARA, S.; BASKARAM, S. Influence of low molecular weight organic acids on the solubilization of phosphates. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 18, p. 311-319, 1994.

BOLLAND, M.D.A. Residual value for wheat of phosphorus from calciphos, Duchess rock phosphate and triple superphosphate on a lateritic soil in south-western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 25, p. 198-208, 1985.

BOLLAND, M.D.A. Residual value of phosphorus from superphosphate for wheat grown on soils of contrasting texture near Esperance, western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 26, p. 209-215, 1986.

BOLLAND, M.D.A.; BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. **Australian Journal of Agriculture Research**, Melbourne, v. 33, p. 1061-1071, 1982.

BOLLAND, M.D.A.; CLARKE, M.F.; YEATES, J.S. Effectiveness of rock phosphate, coastal superphosphate and single superphosphate for pasture on deep sandy soils. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 129- 143, 1995.

- BORGGARD, O.K.; JORGENSEN, S.S.; MOBERG, J.P.; RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 443-449, 1990.
- BRASIL Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 2004. 104 p.
- BÜLL, L.T.; LACERDA, S.; NAKAGAWA, J. Termofosfatos: alterações em propriedade químicas em um latossolo vermelho-escuro e eficiência agrônômica. **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, 1997.
- CARDOSO, I.M.; KUYPER, T.W. Mycorrhizas and tropical soil fertility. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 116, p. 72-84, 2006.
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A.E.; SANTOS, D.C.; FERNANDES, L.A.; CURI, N.; RODRIGUES, D.C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa-de-vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 557-565, 2001.
- CASANOVA, E.F.; SALAS, A.M.; TORO, M. Evaluating the effectiveness of phosphate fertilizers in some Venezuela soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 13-20, 2002.
- CHEN, Y.P.; REKHA, P.D.; ARUN, A.B.; SHEN, F.T.; LAI, W.A.; YOUNG, C.C. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 34, p. 33-41, 2006.
- CHIEN, S.H.; BLACK, C.A. Free energy of formation of carbonate apatites in some phosphate rocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 234-239, 1976.
- CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock as influenced by soil phosphorus fixing capacity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 120, p. 159-164, 1989.
- CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 227-234, 1995.
- CHIEN, S.H.; MENON, R.G.; BILLINGHAM, K.S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1173-1177, 1996.
- CHIEN, S.H.; ADAMS, F.; KHASAWNEH, F.E.; HENAO, J. Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1656-1658, 1987.
- DI, H.J.; CONDRON, L.M.; CAMPBELL, A.S.; GOH, K.M.; CORNFORTH, I.S. Causes for the reduced reactivity of phosphate rock residues in partially acidulated phosphate rocks. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 32, p. 95-10, 1994.

- ESTADOS UNIDOS. Geological Survey. **Phosphate rock**. Disponível em: [http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/phospmcs05.pdf](http://minerals.er.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/phospmcs05.pdf). Acesso em 17 de outubro de 2006.
- FERNANDÉZ, S.M.; MEZA, C.A. Efecto residual de la roca fosfórica de ricito modificada por calcinación o acidulación sobre plantas de maíz en suelos con nivel variable de calcio. **Bioagro**, Barquisimeto, v. 16, n. 2, p. 93-98, 2004.
- FERNANDÉZ, S.M.; NOGUERA, R.S. Producción de fosfatos térmicos a partir de rocas fosfóricas nacionales. **Agronomía Tropical**, Maracay, v. 53, n. 1, p. 49-58, 2003.
- FRANCISCO, E.A.B. **Fosfatos aluminosos do grupo da crandallita como fonte alternativa de fósforo para a cultura do arroz**. 2006. 145p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2006.
- GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tóquio, v. 166, p. 750-755, 2003.
- GIKONYO, E.W.; ZAHARAH, A.R.; HANAFI, M.; ANUAR A.R. Evaluation of residual values of different fertilizers at various rates used in phosphorus recapitalisation of an acid tropical soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Londres, v. 86, p. 2302-2310, 2006.
- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Avaliação agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 97-102, 1984.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, DEP, 1984. 642 p.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. Avaliação preliminar da eficiência de fosfatos com acidulação parcial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, p. 75-80, 1986.
- GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUZA, D.M.G. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 4, p. 521-530, 1990.
- GOVERE, E.M.; CHIEN, S.H.; FOX, R.H. Evaluation of dissolution of nonconventional phosphate fertilizers in Zimbabwe soils: effects on soil properties. **African Journal of Science and Technology**, Nairobi, v. 5, n. 2, p. 73-82, 2004.
- GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agrônomicas Potafos**, Piracicaba, n. 95, p. 1-5, 2001.

GREMILLION, L.R.; McCLELLAN, G.H., Evaluation of phosphatic raw materials. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 43–80.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 189-202, 2005.

HAGIN, J.; HARRISON, R. Phosphate rocks and partially-acidulated phosphate rocks as controlled release P fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 35, p. 25-31, 1993.

HAQUE, I.; LUPWAYI, N.Z.; SSALI, H. Agronomic effectiveness of unacidulated and partially acidulated Minjingu rockphosphates on *Stylosanthes guianensis*. **Tropical Grasslands**, Brisbane, v. 33, p. 159-164, 1999.

HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; EASTERWOOD, G.W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 3, p. 1601-1606, 1986.

HAMMOND, L.L., CHIEN, S.H.; MOKWUNYE, A.U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 40, p. 89-140, 1986.

HAROLD, S.A.; TABATABAI, M.A. Release of inorganic phosphorus from soils by Low-Molecular-Weight Organic Acids. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 37, n. 9, p. 1233-1245, 2006.

HE, Z.L.; YAO, H.; CALVERT, D.V.; STOFFELLA, P.J.; YANG, X.E.; CHEN, G.; LLOYD, G.M. Dissolution characteristics of Central Florida phosphate rock in an acidic sandy soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 273, n. 1-2, p. 157-166, 2005.

HOPPO, S.D.; ELLIOT, D.E.; REUTER, D.J. Plants test for diagnosing phosphorus deficiency in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 58, p. 185-188, 1999.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 41-47, 2004.

HUGHES, J.C.; GILKES, R.J. The effect of rock phosphate properties on the extent of fertilizer dissolution in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 24, n. 2, p. 209-217, 1986.

KAMINSKI, J. **Efeito de cinco fosfatos pré, co e pós aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo em três solos ácidos**. 1983. 126 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

- KANABO, J.A., GILKES, R.J. The role of pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 12, p. 165-174, 1987.
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 10, p. 159-206, 1978.
- KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: WI American Society of Agronomy, 1980. 910 p.
- KIRK, G.J.D. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, p. 369-378, 1999.
- KLIEMANN, H.J.; LIMA, D.V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 111-119, 2001.
- KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999.
- KPOMBLEKOU-A, K.; TABATABAI, M. A. Effect of low molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 100, p. 275-284, 2003.
- LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 525-528, 2004.
- LEHR, J.R.; McCLELLAN, G.H. **A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application**. Muscle Shoals: National Fertilizer Development Center, 1972. 36 p. (Bulletin, Y-43).
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibrium in soils**. Toronto: John Willey, 1979. 449 p.
- LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 62 p.
- LOPES, A.S. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: SIMPÓSIO DE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726 p.
- LOPES, A.C.; GOEDERT, W.J. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987, São Paulo. São Paulo: Ibrafos, 1987. p. 24-29.

- LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. **Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para produção agropecuária**. São Paulo: ANDA. 1992. 49 p. (Boletim Técnico, 5)
- LOPEZ HERNANDEZ, D.; SIEGERT, G.; RODRÍGUEZ, J.V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 1460-1462, 1986.
- MACKAY, A.D.; SYERS, J.K. Effect of phosphate, calcium and pH on the dissolution of a phosphate rock in soil. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 175-184, 1986.
- MACKAY, A.D.; WEWALA, G.S. Evaluation of partially acidulated phosphate fertilizers and reactive phosphate rock for hill pastures. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 21, p. 149-156, 1990.
- MALAVOLTA, E. **Adubos e adubação fosfatada**. São Paulo: Fertilizantes Mitsui, 1985. 61 p.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H. Phosphorus availability to maize from partially acidulated phosphate rocks and phosphate rocks compacted with triple superphosphate. **Plant and Soil**, v. 127, p. 123-128, 1990.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; GADALLA, A.N. Phosphate rocks compacted with superphosphates vs. partially acidulated rocks for bean and rice. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1480-1484, 1991.
- MINHONI, M.T.A.; CARDOSO, J.B.N.; EIRA, A.F. Efeito de cinco tipos de matéria orgânica na solubilização microbiana de fosfato de rocha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 29-35, 1991.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; VIRGENS FILHO, A.C.; SILVEIRA, R.L.V.A.; ABREU, J.B.R. Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. 1-2, 1997.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1459-1466, 2002.
- NAHAS, E. Solubilização microbiana de fosfatos e de outros elementos. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTININNETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p. 467-486.
- 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, n. 2, 1998.

- NOVAIS, R.F.; SMYTH, J.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, A.P.; ARAÚJO, L.R.; MENDES, J.E.M.F.; DANTAS JÚNIOR, O.R.; SILVA, M.S. Resposta do coentro à adubação fosfatada em solo com baixo teor de fósforo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 87-89, 2004.
- OLIVEIRA, A.P.; CARDOSO, M.O.; BARBOSA, L.J.N.; SILVA, J.E.L.; MORAIS, M.S. Resposta do feijão-vagem a  $P_2O_5$  em solo arenoso com baixo teor de P. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 1, p. 128-132, 2005.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1199-1204, 2001.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 83-90, 2001.
- PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726 p.
- PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; TAYLOR, R.W.; CARMONA, G.; HENAO J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 761-768, 2004.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343p.
- RAJAN, S.S.S. Partial acidulation of an “unground” phosphate rock: II. Plant Availability of phosphate. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 8, p. 219-229, 1986.
- RAJAN, S.S.S.; MARWAHA, B.C. Use of partially acidulated phosphate rocks as phosphate fertilisers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 35, p. 47-59, 1993.
- RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H. Unacidulated and partially acidulated phosphate rock: agronomic effectiveness and the rates of dissolution of phosphate rock. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 33, p. 267-277, 1992.
- REDDY, D.D.; RAO, A.S.; REDDY, K.S.; TAKKAR, P.N. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on Vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 62, p. 181-190, 1999.
- REIS, N.P. Perspectivas para o fósforo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES, 2., 2002, São Paulo. **Palestra...** São Paulo: ANDA, 2002. 364 p.

- RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURI, N.; LAGO, F.J. Resposta do fósforo a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 458-466, 2006.
- RESSELER, H.; WERNER, W. Properties of unreacted rock residues in partially acidulated phosphate rocks affecting their reactivity. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 20, p. 135-142, 1989.
- RICHARDS, I.R.; JOHNSTON, A.E. **The effectiveness of different precipitated phosphates as sources of phosphorus for plants**. Disponível em <<http://www.nhm.ac.uk/mineralogy/phos/2001>>. Acesso em: 21 de novembro de 2006.
- RIEDER, J.H. Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 1986, Brasília. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1986. cap. 3, p. 135-172.
- SAGOE, C.I.; ANDO, T.; KOUNO, K.; NAGAOKA, T. Residual effects of organic acid-treated phosphate rock on some properties and phosphate availability. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tóquio, v. 44, n. 4, p. 627-634, 1998.
- SANCHEZ, P.A. Soil fertility and hunger in Africa. **Science**, Washington, v. 295, p. 2019-2020, 2002.
- SANCHEZ, P.A.; SALINAS, J.G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 34, p. 280-406, 1981.
- SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 471-514.
- SANZONOWICZ, C.; LOBATO, E.; GOEDERT, W.J. Efeito residual da calagem e de fontes de fósforo numa pastagem estabelecida em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 233-243, 1987.
- SAVANT, N.K.; CHIEN, S.H. Greenhouse evaluation of urea supergranule containing diammonium phosphate for transplanted rice. **International Rice Research Newsletter**, Manila, v. 15, p. 23-24, 1990.
- SAVINI, I.; SMITHSON, P.C.; KARANJA, N.K. Effects of added biomass, soil pH and calcium on the solubility of Minjingu phosphate rock in a Kenyan Oxisol. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Halle, v. 52, n. 1, p. 19-36, 2006.
- SENGIK, E; KIEHL, J.C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 455-461, 1995.

SHU, L.; SCHNEIDER, P.; JEGATHEESAN, V.; JOHNSON, J. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. **Bioresource Technology**, Essex, v. 97, p. 2211-2216, 2006.

SILVA, E.B.; RESENDE, J.C.F.; CINTRA, W.B.R. Resposta do feijoeiro a doses de fósforo em solo arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 973-977, 2001.

SINGH, C.P.; AMBERGER, A. The effect of rock phosphate enriched compost on the yield and phosphorus nutrition of rye grass. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v. 10, n. 2, p. 82-87, 1995.

SMYTH, T. J.; SANCHEZ, P. A. Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an oxisol on phosphorus sorption and ion retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 500-505, 1980.

SOUSA, D.M.G.; SANZONOWICZ, C.; MIRANDA, J.C.C.; SMYTH, T.J. Manejo do fósforo na cultura da soja e braquiária em Latossolo Vermelho Amarelo de cerrado. **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982/1985**. Planaltina: CPAC, 1987. p. 115-120.

STAMFORD, N.P.; FREITAS, A.D.S.; FERRAZ, D.S.; SANTOS, C.E.R.S. Effect of sulphur inoculated with *Thiobacillus* on saline soils amendment and growth of cowpea and bean legumes. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 139, p. 275-281, 2002.

STAMFORD, N.P.; SANTOS, P.R.; MOURA, A.M.M.F.; SANTOS, C.E.R.S. FREITAS, A.D.S. Biofertilizers with natural phosphatem sulphur and *Acidithiobacillus* in a soil with low available P. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 609-613, 2000

STAMFORD, N.P.; SANTOS, P.R.; SANTOS, C.E.S.; FREITAS, A.D.S.; DIAS, S.H.L.; LIRA JUNIOR, M.A. Agronomic effectiveness of biofertilizers with phosphate rock, sulphur and *Acidithiobacillus* for bean grown on a Brazilian tableland acidic soil. **Bioresource Techonology**, v. 98, n. 6, p. 1311-1318, 2007.

STEEN, I. Phosphorus availability in the 21<sup>st</sup> century management of a non-renewable resource. **Phosphorus and Potassium**, 217p, 1998.

STEFANUTTI, R.; MALAVOLTA, E.; MURAOKA, T. Recuperação do fósforo residual do solo, derivado de um termofosfato magnésiano com diferentes granulometrias e do superfosfato simples granulado. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 2, p. 233-238, 1995.

STEPHEN, R.C. The agronomic value of products resulting from the partial acidulatin of North Carolina hospthate rock with phosphoric acid. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 8, p. 67-73, 1985.

STEPHEN, R.C.; CONDRON, L.M. An assessment of the agronomic efficiency of partially acidulated phosphate rock fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 269-282, 1986.

- SYERS, J.K.; MACKAY, A.D. Reactions of Sechura phosphate rock and single superphosphate in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 480-485, 1986.
- VAN DER EIJK, D.; JANSSEN, B.H.; OENEMA, O. Initial and residual effects of fertilizer phosphorus on soil phosphorus fixing soils – A case study in south-west Kenya. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 116, p. 104-120, 2006.
- VILLANUEVA, F.C.A.; MURAOKA, T.; TREVIZAM, A.R.; FRANZINI, V.I.; ROCHA, A.P. Improving phosphorus availability from patos phosphate rock for Eucalyptus: a study with <sup>32</sup>P radiotracer. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 65-69, 2006.
- VITTI, G.C.; WIT, A.; FERNANDES, B.E.P. Eficiência agrônômica dos termofosfatos e fosfatos alternativos. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726 p.
- WOLTHOORN, A.; TEMMINGHOFF, E. J. M.; WENG, L.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Colloid formation in groundwater: effect of phosphate, manganese, silicate and dissolved organic matter on the dynamic and heterogeneous oxidation of ferrous iron. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 19, p. 611-622, 2004.
- YAMPRACHA, S.; ATTANANDANA, T.; SIDIBE-DIARRA, A.; SRIVIHOK, A.; YOST, R.S. Predicting the dissolution of four rock phosphates in flooded acid sulfate soils of Thailand. **Soil Science**, Baltimore, v. 171, n. 3, p. 200-209, 2006.
- ZAPATA, E.; ZAHARAH, A.R. Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water soluble phosphate fertilizer. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, p. 43-48, 2002.
- ZAPATA, E.; ROY, R.N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004. 172 p. (Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 13).

### **3 EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE COMPOSTOS ORGANO-FOSFATADOS OBTIDOS PELO PROCESSO HUMIFERT**

#### **Resumo**

A produção de fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água gera muitos rejeitos, em todas as etapas, e entre esses estão materiais ainda ricos em P, mas cujo aproveitamento não é possível, representando um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante devido aos grandes volumes envolvidos. No intuito de utilizar esses rejeitos surgiu o processo Humifert (Toulouse – França), que tem como objetivo o tratamento ácido da mistura de minérios fosfáticos (de elevado ou baixo teor de P) com material orgânico, incrementando a solubilidade do P contido no composto fertilizante, e provavelmente, a eficiência agronômica. Foi construído um reator Humifert micro-piloto no Brasil, para funcionamento em escala de bancada. Assim, o presente trabalho teve por objetivo contribuir com informações referentes à produção e eficiência agronômica relativa dos compostos fertilizantes organo-fosfatados produzidos por esse processo. Para tal, foram realizados testes de funcionamento do equipamento, como tempo de exposição das misturas, testes de solubilidade de P em diversos extratores e ensaios agronômicos em condições de casa-de-vegetação, visando avaliar a eficiência agronômica dos compostos obtidos em relação à uma fonte de elevada solubilidade em água. Foram conduzidos dois ensaios agronômicos, sendo um com fosfato monocalcico, rocha fosfática de Patos de Minas e turfa, submetidos ou não ao processo Humifert, e cultivado milho. O segundo ensaio teve como fontes de P fosfato monocalcico, fosfato reativo de Arad, rejeito de Tapira e turfa, submetidos ou não ao processo Humifert. Como planta teste foi utilizado milho, e posteriormente braquiária (3 cortes), com objetivo de avaliar o efeito residual das fontes. Em ambos foi avaliada a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas e os dados foram submetidos ao teste de médias para avaliar o efeito dos tratamentos. No primeiro experimento o FMC proporcionou maior MSPA que os outros tratamentos, porém a mistura da RF de PM e turfa foi superior em relação ao controle. No segundo experimento, embora o FMC também tenha sido superior na primeira cultura (milho), na média de todos os cultivos a RF de Arad foi equivalente ao FMC. O processo Humifert melhorou a performance agronômica da RF de Arad quando se compara essa fonte com e sem submissão ao reator. A fonte de P Tapira não diferiu do controle devido ao baixo teor de P solúvel. Embora tenha havido algumas vantagens em termos de incremento de MSPA devido ao processo Humifert, a solubilidade e resultados agronômicos ainda indicam a necessidade de mais pesquisas de forma a adequar as reações para obter melhor qualidade das fontes de P.

Palavras-chave: Fonte alternativa de fósforo; Processo Humifert; Eficiência agronômica relativa

## **Agronomic effectiveness of organo-phosphates compounds obtained by the Humifert process**

### **Abstract**

The production of phosphate fertilizers containing high water solubility can generate high amounts of residues with appreciable amounts of P. These materials represent a sub utilization of the phosphate rock and also can cause environmental problems if not properly discarded. With the objective of utilizing these residues the Humifert process was created in Toulouse, France. It consists in the nitric acid treatment of a mixture of phosphatic (low or high contents of P) and organic materials in a chamber, with the goal of increasing P solubility and the agronomic effectiveness. As to study this technique in Brazilian conditions initially a micro-pilot reactor was built to work in a bench scale. The present work continued with the objectives of generating information relative to the production of the "Humifert" fertilizers and testing the agronomic effectiveness of the organo-phosphate compounds from the process. Several tests were applied as related to the operating conditions of the equipment, as reaction time and solubility in diverse extractors. Two agronomic experiments were conducted in a greenhouse, relating the results of the products obtained in the equipment with a standard source of P, the monocalcium phosphate (MCP). The first experiment tested the Patos de Minas phosphate rock (PR) and organic matter, submitted or not to the Humifert process, with maize as the testing crop. The second experiment used the P sources Arad PR and Tapira residue, and organic matter, also submitted or not to the Humifert process. As to test also the residual effect of the diverse P sources the testing crops were now corn followed by three successive harvests of *Brachyaria* grass. In both experiments the dry-matter yield (DMY) of the crops were evaluated by mean statistics by the Tukey test using the SAS software. In the first experiment the MCP lead to higher DMY than all other treatments but the mixture of Patos PR and organic matter was superior than the control with no P added. In the second experiment, although also the MCP was superior in the first crop (maize) in the overall of all harvests the Arad PR was equal to the MCP. The Humifert process lead to higher agronomic performance of the Arad PR when comparing this source with and without submission to the reaction chamber. The Tapira source of P did not differ from the control due to still very low contents of available P. Although some advantages in terms of increase in DMY due to the Humifert process, the solubility and agronomic results still indicate that more research is necessary as to adequate the reaction to obtain better quality P sources.

Keywords: Phosphorus alternative sources; Humifert process; Relative agronomic effectiveness

### **3.1 Introdução**

As principais fontes de P utilizadas na agricultura, conforme exposto anteriormente, são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas com ácidos e apresentam elevada solubilidade em água, como os superfosfatos e os fosfatos de amônio, porém, nos solos tropicais agricultáveis, essas fontes apresentam rápida dissolução, favorecendo a interação do elemento com o solo e reduzindo a biodisponibilidade de P às plantas.

Nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas, como as rochas fosfáticas em estado natural (fosfato natural), aumentou acentuadamente, embora esses produtos apresentem baixa solubilidade em água quando comparados aos fosfatos solúveis (HOROWITZ; MEURER, 2003).

Rocha fosfática é um termo impreciso que inclui tanto rochas não processadas como concentrados beneficiados. Praticamente toda a produção de fertilizantes fosfatados é baseada em rochas fosfáticas contendo alguma forma de apatita mineral, a qual é proveniente de distintas situações geológicas (sedimentares, ígneas e metamórficas), o que proporciona aos materiais fosfáticos diferentes características mineralógicas, micromorfológicas, geoquímicas e cristal químicas, levando à geração de produtos de variada reatividade (IFDC/UNIDO, 1979).

A produção de fertilizantes fosfatados a partir destes minérios gera muitos rejeitos, em todas as etapas, desde a lavra ao beneficiamento, passando pelos processos industriais de produção de fertilizantes e sua aplicação nos solos. Entre os rejeitos estão materiais ainda ricos em P, mas cujo aproveitamento não é possível pelos atuais métodos industriais, representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, visto os grandes volumes envolvidos (SILVEROL, 2006).

Na tentativa de utilização desses rejeitos surgiu o processo Humifert, proposto por pesquisadores franceses em 1988, baseando-se no tratamento da mistura de minérios fosfáticos com material orgânico.

O interesse no tratamento de matérias orgânicas por óxidos de nitrogênio é registrado por diversas patentes. Em 1910 os noruegueses descreveram um método para solubilização de fosfatos por ácido nítrico. Em 1919 uma patente francesa propõe o tratamento de materiais vegetais e lixos urbanos por gás nitroso pouco concentrado para aumentar o valor fertilizante pelo aumento no teor de nitrogênio. Nos anos de 1933 e de 1934, patentes francesa e alemã, respectivamente, preconizam o preparo de fertilizantes pelo ataque de linhita ou turfa umidificada, misturada a fosfatos, por gases contendo óxidos de nitrogênio, porém a etapa seguinte, a neutralização do produto com amoníaco, retorna o fosfato ao estado insolúvel. A patente americana de 1936 consistia em atacar minérios fosfatados por cloretos de nitrosila, gerados a partir de cloretos alcalinos pela ação de óxidos de nitrogênio (BIDEGAIN, 1995).

O processo Humifert, proposto pelos pesquisadores franceses Sternicha e Benard, foi patenteado em 30/12/1988 (nº 88 17.596), e desenvolvido pela empresa Sofreco-Sofrechim e o Laboratório de físico-química de fosfato da Escola Nacional Superior de Química de Toulouse e

do Instituto Nacional Politécnico (ENSCT-INP). Propõe a elaboração de um fertilizante organo-fosfatado através de técnicas simples, a partir de rochas fosfáticas (baixo ou alto teor de  $P_2O_5$ ) e materiais orgânicos. Consiste em tratar, em reator sob ligeira pressão, a mistura úmida de matéria orgânica triturada, de origem vegetal ou animal, e rochas fosfáticas moídas (OBA, 2000).

Nas patentes francesas anteriores à Humifert a função da matéria orgânica era a de dar suporte físico à mistura, garantindo a permeabilidade para passagem dos gases. Não era assinalado o interesse agrônômico da matéria orgânica.

Na presença da umidade da mistura e com a formação de óxidos de nitrogênio na coluna do reator Humifert, ocorre a produção de ácido nítrico nascente na mistura. É relatado no trabalho de Oba (2000) que com a formação do ácido nítrico na superfície da mistura, a dissolução do material fosfático é favorecida, aumentando a solubilidade e, conseqüentemente, a eficiência agrônômica.

Os objetivos do processo, de acordo com os proponentes Sternicha e Benard, foram: (i) conhecer melhor a interação entre fósforo e matéria orgânica do ponto de vista físico-químico, reduzindo a retrogradação de P e tornando solúveis os fosfatos insolúveis; (ii) comprovar a eficiência técnica e econômica do fertilizante; (iii) viabilizar depósitos de fosfatos que possuem baixos teores de  $P_2O_5$ , e que exigiriam tratamentos complexos de fabricação de fertilizantes fosfatados; e (iv) oferecer aos agricultores fertilizantes de menor custo relativo, fabricados em instalações de pequeno porte.

O tratamento no equipamento Humifert é realizado por uma mistura gasosa de óxidos de nitrogênio, obtidos pela oxidação catalítica da amônia em recipiente apropriado, e ar com vapor d'água, levando à formação de ácido nítrico nascente (muito reativo) na superfície da mistura sólida, produzindo o ataque do fosfato. Paralelamente, sugere-se a ocorrência de oxidação do material orgânico, conduzindo à ruptura de cadeias carbônicas, produzindo moléculas mais simples e curtas em relação às cadeias longas iniciais. Estas moléculas orgânicas simplificadas, supostamente, seriam semelhantes aos ácidos húmicos e fúlvicos extraídos dos solos, apresentando a propriedade de quelação de cátions (cálcio, ferro, alumínio e magnésio). Estes compostos têm a função de retardar a retrogradação dos fosfatos, ou mesmo remobilizar aqueles já retrogradados (ROUQUET, 1989).

De acordo com Oba (2000), ao final, após a maturação de alguns dias sob a forma de compostagem, o produto conterà fosfato parcialmente solúvel, materiais orgânicos pré-

humificados e nitratos. A forma físico-química destes compostos (complexos fósforo-húmicos) pode ser particularmente interessante por ocorrer envolvimento das partículas de fosfatos pelos compostos orgânicos, permitindo ao P ser disponível por um período relativamente mais prolongado, evitando-se a rápida retrogradação. Esse contexto se encaixa nas idéias mais modernas de desenvolvimento sustentado, conservação de recursos naturais e tecnologia limpa.

Oba (2000) estudou onze amostras de fosfatos de três grandes depósitos brasileiros (Jacupiranga/SP, Catalão/GO e Patos de Minas/MG) para produção de fertilizantes organo-fosfatados, sendo essas amostras provenientes de minérios marginais, rejeitos da lavra, rejeitos da usina e minérios complexos ao beneficiamento devido ao elevado teor de impurezas, como óxidos/hidróxidos de ferro ou carbonatos. As diferentes amostras de fosfatos, misturadas à turfa da região do baixo Ribeira de Iguape ou à turfa comercial francesa, foram processadas em equipamento micropiloto. O autor relata que nos ensaios agronômicos obteve a assimilação de 23% a 81% de P pelas plantas (grama italiana). Portanto, concluiu que o processo Humifert é capaz de gerar produtos eficazes a partir de materiais fosfáticos descartados no processo tradicional de fabricação de fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água. O autor ainda destaca que o aproveitamento desses materiais poderá aumentar a reserva e a vida útil das jazidas, com redução de custos de produção.

É comentado por Oba (2000) que esse processo estudado oferece uma alternativa para o aproveitamento de materiais rejeitados no processo convencional, como: minérios inadequados às condições usuais da usina de beneficiamento; rejeitos com teores baixos de  $P_2O_5$  (rejeitos/estéreis das frentes de lavra e rejeitos das usinas de beneficiamento); minérios complexos ou inviáveis à obtenção de concentrados que atendam às especificações de mercado; e depósitos pequenos, ricos ou pobres em  $P_2O_5$  que não interessam às grandes mineradoras, mas capazes de suprir localmente a demanda por fertilizantes fosfatados. Entretanto, considera-se que estudos no sentido de avaliar a eficiência agronômica relativa dos compostos fertilizantes obtidos a partir do processo Humifert ainda são escassos. Há, sem dúvida, necessidade de mais pesquisas que possibilitem, quando analisadas em conjunto, conclusões mais seguras sobre o método proposto, genericamente denominado de "Humifert".

Assim, diante da importância de continuidade dos estudos sobre esse processo, o presente trabalho teve como objetivo geral contribuir com informações relativas à produção e eficiência agronômica dos compostos fertilizantes organo-fosfatados produzidos em relação à fonte de

elevada solubilidade em água, tradicionalmente empregada. Os objetivos específicos foram: (i) montagem e funcionamento do equipamento em condições brasileiras; (ii) aplicação do processo; (iii) caracterização (testes de solubilidade de P) das matérias-primas e produtos obtidos; e (iv) avaliação da eficiência agrônômica em condições de casa-de-vegetação.

Assume-se como hipótese geral que os compostos produzidos apresentarão maior solubilidade em relação aos materiais que não foram submetidos ao processo e, conseqüentemente, serão agronomicamente mais eficientes.

## **3.2 Desenvolvimento**

### **3.2.1 Material e Métodos**

#### **3.2.1.1 Definição e caracterização das matérias-primas usadas no processo Humifert**

Como materiais fosfáticos para produção dos compostos organo-fosfatados foram utilizados materiais de importância em termos de localização ou de riqueza em reservas totais ou teores, mas contendo fatores limitantes para o aproveitamento tradicional do material enriquecido em  $P_2O_5$ , e material rejeitado proveniente de usina de mineração. As amostras utilizadas são provenientes do minério de Patos de Minas (MG) concentrado, coletadas nos poços de pesquisa, e do minério de Tapira, rejeitado no processo tradicional de fabricação de fertilizante fosfatado.

Para efeito de comparação da eficiência agrônômica, foi utilizado o fosfato natural reativo de Arad, material comumente comercializado e já bastante estudado em outras pesquisas. É apresentado na tabela 1 o teor total de  $P_2O_5$  e a solubilidade desses materiais em citrato neutro de amônio + água (CNA), ácido cítrico a 2% (AC) e em água.

A rocha fosfática de Patos de Minas, de acordo com a legislação brasileira, pode ser classificada como fosfato natural por possuir teor total de  $P_2O_5$  superior a 24% e solubilidade em ácido cítrico maior que 4%. O material fosfático de Arad é classificado como fosfato natural reativo e para tal deve apresentar teor de  $P_2O_5$  total superior a 27% e no mínimo 30% do total solúvel em ácido cítrico. Já o material proveniente de Tapira é denominado rejeito, e apresenta baixo teor de fósforo, havendo necessidade futura de concentração e beneficiamento caso este se mostre, em testes preliminares, eficiente agronomicamente.

Tabela 1 - Teor total de  $P_2O_5$  e solubilidade em citrato neutro de amônio (CNA), ácido cítrico a 2% (AC) e em água dos materiais fosfáticos

Materiais fosfáticos	$P_2O_5$ Total (%)	$P_2O_5$ solúvel (%)		
		CNA	AC	água
Patos de Minas	24,9	1,1	5,9	0,0
Arad	32,0	5,4	11,4	0,1
Tapira rejeito	2,4	0,2	0,5	0,0

Como fonte de matéria orgânica foram utilizadas amostras de turfa denominada “Solomax”, comercializada para fins de jardinagem (Tabela 2). Este produto caracteriza-se por apresentar 48,8% de matéria orgânica total, sendo 72,8% desse total compostável, 19,7% de carbono orgânico, e somente 0,06% de  $P_2O_5$  total. Na composição da turfa podem ser encontrados os seguintes constituintes básicos: betumes, como os ácidos graxos, ceras e esteróides (passíveis de dissolução por alguns solventes orgânicos); ácidos húmicos (solúveis em meio alcalino); carboidratos, como celulose e proteínas (passíveis de solubilização em meio ácido); e ligninas, substâncias fenólicas que atuam como cimento nas fibras celulósicas das plantas, conferindo-lhes estabilidade estrutural (FUCHSMAN, 1980).

Em função do seu elevado teor de matéria orgânica, a turfa influencia a fertilidade do solo, devido: (i) ao fornecimento de nutrientes; (ii) à melhoria da estrutura do solo; (iii) ao aumento da população microbiana devido ao aumento de C e N; (iv) ao aumento da capacidade de troca catiônica e do poder tampão do solo; e (v) à solubilização de nutrientes (PINTO et al., 2004). É relatado que há estímulo na absorção de N e P na presença de compostos de baixo peso molecular presentes nas substâncias húmicas (NARDI et al., 2005). Dessa maneira, devido às propriedades citadas, a turfa foi escolhida como material orgânico, e também por ter sido usada em trabalho anterior realizado por Oba (2000), permitindo assim possível comparação dos resultados obtidos.

Tabela 2 - Caracterização química da turfa

<b>Determinações / Unidade</b>	<b>Umidade natural</b>	<b>Base seca (110°C)</b>
pH em CaCl <sub>2</sub> 0,01M	5,3	-
Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	0,7	-
Umidade perdida a 60-65 °C (%)	46,5	-
Umidade perdida entre 65 e 110 °C (%)	2,7	-
Umidade total (%)	49,1	0
Inertes	0,0	-
Matéria orgânica total (combustão) (%)	24,8	48,8
Matéria orgânica compostável (%)	18,1	35,5
Matéria org. resistente à compostagem (%)	6,8	13,3
Carbono total (orgânico e mineral) (%)	13,8	27,1
Carbono orgânico (%)	10,0	19,7
Resíduo mineral total (%)	26,0	51,2
Resíduo mineral insolúvel (%)	18,7	36,7
Resíduo mineral solúvel (%)	7,4	14,5
Nitrogênio total (%)	0,7	1,4
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) total (%)	0,0	0,1
Potássio (K <sub>2</sub> O) total (%)	0,1	0,2
Cálcio (Ca) total (%)	0,2	0,4
Magnésio (Mg) total (%)	0,6	1,1
Enxofre (S) total (%)	0,1	0,2
Relação C/N (C total e N total)	19/1	19/1
Relação C/N (C orgânico e N total)	14/1	14/1
Cobre (Cu) total (mg kg <sup>-1</sup> )	21	41
Manganês (Mn) total (mg kg <sup>-1</sup> )	67	132
Zinco (Zn) total (mg kg <sup>-1</sup> )	18	35
Ferro (Fe) total (mg kg <sup>-1</sup> )	4.181	8.221
Boro (B) (mg kg <sup>-1</sup> )	2	4
Sódio (Na) total (mg kg <sup>-1</sup> )	287	564

### 3.2.1.2 Funcionamento do equipamento Humifert

A empresa Tecnal (Piracicaba/SP) montou o equipamento Humifert de acordo com o projeto original cedido por pesquisadores do Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT-França). No Brasil, o equipamento (Figura 1) encontra-se instalado no Instituto de Geociências/USP.

As etapas químicas determinantes do processo são três: (i) a combustão da amônia, que resulta na formação de óxidos nitrosos, (ii) a transformação oxidativa destes óxidos em óxidos nítricos, e (iii) o ataque dos fosfatos com a formação do ácido nítrico nascente na mistura.

A combustão da amônia é realizada através da oxidação que ocorre com um catalisador constituído de telas de platina. Esta reação conduz à formação de monóxido de nitrogênio e água. Os óxidos nitrosos vão sofrer oxidação e transformar-se em óxidos nítricos. O óxido nítrico produzido reage com a umidade da mistura, gerando o ácido nítrico e ácido nitroso. Enquanto o ácido nítrico recém formado reage com os compostos da mistura, o ácido nitroso sofrerá novas transformações, resultando em óxidos nitrosos (BIDEGAIN, 1995).

O equipamento é composto basicamente por três partes: (i) forno, (ii) recipiente oxidante e (iii) reator (ROUQUET, 1989), conforme indicado na figura 1. Opera através da passagem de fluxo de ar com óxidos de nitrogênio pela mistura de rocha fosfática com material orgânico úmidos (umidade entre 20 e 30% dependendo da textura dos materiais utilizados, de modo a permitir a passagem dos gases pela mistura).

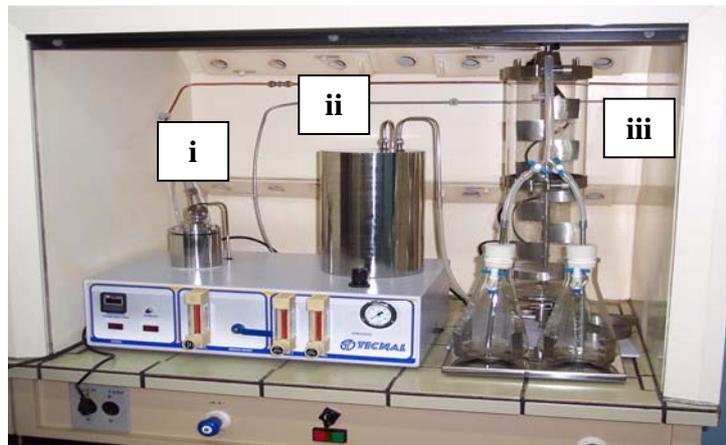


Figura 1- Equipamento Humifert: (i) forno, (ii) recipiente oxidante e (iii) reator

A amônia é misturada ao ar primário antes de entrar no forno e a temperatura dentro desse é controlada por um termômetro, sendo mantida abaixo de  $800^{\circ}\text{C}$  a fim de evitar a dissociação do monóxido de nitrogênio. A reação de oxidação da amônia no forno se automantém a partir de temperatura de  $650^{\circ}\text{C}$ . Desta forma inicia-se a reação no forno, com ajuda de uma chama alimentada por hidrogênio.

O monóxido de nitrogênio formado no forno é encaminhado ao recipiente oxidante, que tem a função de resfriar os gases, que poderiam provocar a secagem e destruição da matéria orgânica. Isso é feito através de um trocador de calor de superfície onde circula água. Neste

recipiente ocorre a oxidação do monóxido de nitrogênio. Os óxidos de nitrogênio passam para o reator, onde em contato com a água da mistura, se transformam em ácido nítrico nascente. O reator é composto por uma coluna de vidro e uma grelha de aço inoxidável que suporta a mistura no reator. Um sistema de válvulas permite a chegada do gás reativo pela parte inferior da coluna, e pás circulam pela mistura ao longo da exposição ao processo, garantindo uma homogeneização no tratamento.

Foi realizada uma etapa de testes no equipamento para identificar as condições ideais de funcionamento do mesmo. Nessa fase o equipamento funcionava com o objetivo de obter os valores ideais de fluxo dos gases, desde a fase de ignição até a fase de admissão de amônia e supressão de hidrogênio, e para obtenção da temperatura ideal para que as reações acontecessem satisfatoriamente no reator. Dessa maneira foi elaborada uma seqüência de passos para ignição e manutenção das reações no reator.

Posteriormente, iniciaram-se os testes com as misturas de material fosfático e orgânico. Nessa etapa foram verificados diversos problemas com o equipamento, como corrosão de partes internas, vazamento na central de amônia, acarretando em problemas para produção dos compostos, que, posteriormente, foram sanados.

### **3.2.1.3 Produção dos compostos**

Para o preparo das misturas estabeleceu-se a relação de 2:1 de Corg:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total fornecida pelo material orgânico e rocha fosfática, respectivamente. Esta relação foi definida a partir de testes preliminares, onde se constatou empiricamente que tal proporção deveria fornecer adequada condição física para a passagem de gases, além de, para a maioria dos fertilizantes finais, um teor razoável de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Foi definida a quantidade de 1.000 g de composto a ser produzida devido às condições da coluna de vidro que recebe esse material para o posterior ataque ácido.

Assim, em função das características de cada material foram calculadas as seguintes quantidades de matéria-prima, obedecendo a relação 2 Corg:1 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total:

- a) Composto Patos de Minas + turfa = 283,3 g + 716,7 g
- b) Composto Arad + turfa = 235,6 g + 764,4 g
- c) Composto rejeito de Tapira + turfa = 805,6 g + 194,4 g

Seguidos a essa etapa, foram feitos testes de tempo de exposição do material no equipamento, com o objetivo de verificar a variação da solubilidade nos diferentes extratores (CNA + água, ácido cítrico e água) em função do tempo de exposição do material e definir qual proporcionou maior solubilização da rocha fosfática, ou seja, o tempo a ser utilizado para produção dos compostos aplicados nos experimentos agronômicos conduzidos.

Em trabalho conduzido por Silverol (2006) foram testados os períodos de 2, 4, 6, 8, 10 e 12 horas de exposição ao equipamento Humifert, sendo definido o tempo de 12 horas para a mistura de rocha fosfática de Angico dos Dias (fonte de P) e lodo de esgoto (material orgânico). Neste período foi obtido o maior incremento de solubilidade no composto produzido.

Para o presente trabalho foram testados períodos ainda maiores de exposição dos materiais às reações no equipamento Humifert com o objetivo de verificar se haveria incremento na solubilidade. Foram avaliados os períodos de 12, 16 e 35 horas de exposição da mistura do material de Patos de Minas concentrado (PM) com turfa (T) (PMT), 16 e 35 horas para a mistura do fosfato reativo de Arad (A) com turfa (AT) e 16 horas para a mistura do rejeito de Tapira (Tap) com turfa (TapT). As misturas não foram expostas às reações pelo mesmo período de tempo, ou seja, todas submetidas aos períodos de 12, 16 e 35 horas, por questão de necessidade de constantes reparos no decorrer do funcionamento do equipamento.

#### **3.2.1.4 Caracterização dos materiais**

A caracterização dos materiais fosfatados foi feita através de quatro determinações: (i) teor total de  $P_2O_5$ , que inclui todas as formas químicas de fosfatos e é realizada utilizando-se ácido clorídrico, (ii) teor solúvel em citrato neutro de amônio mais água, (iii) teor solúvel em ácido cítrico a 2%, e (iv) teor solúvel em água (BRASIL, 2004). O processo de determinação do fósforo disponível nos compostos produzidos incluiu duas etapas: (i) extração do fósforo pelos diferentes solventes ou ácidos e, (ii) determinação da quantidade de fósforo extraída, que nesse estudo foi feita por gravimetria.

#### **3.2.1.5 Experimentos agronômicos**

A experimentação agronômica foi realizada em condições de casa-de-vegetação, no Departamento de Ciência do Solo/ESALQ-USP.

Para definição da dose a ser utilizada nos experimentos de avaliação da eficiência agronômica dos compostos obtidos pelo processo Humifert foi realizado um experimento preliminar (curva de resposta). Para tal foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade, localizado na Serra de Itaqueri (município de São Pedro/SP). Esse tipo de solo foi escolhido principalmente devido ao baixo teor de fósforo, sendo essa característica considerada adequada para o objetivo dos ensaios agronômicos.

As amostras de terra foram coletadas, passadas em peneira com malha de 4 mm de abertura e em seguida secas ao ar. Posteriormente, foram retiradas subamostras, passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura e submetidas à caracterização química (Tabela 3), utilizando procedimentos analíticos descritos por Raij et al. (2001). O pH do solo foi determinado em solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  na relação de 1:2,5. O fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram extraídos com resina trocadora de íons, e a quantificação de P e K foi feita por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. A determinação do Ca e Mg foi efetuada através da técnica de espectrometria de absorção atômica. Para extração do enxofre utilizou-se uma solução de fosfato de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e a quantificação foi por turbidimetria. A extração do carbono foi feita através do uso de dicromato de sódio e a quantificação pelo método colorimétrico.

Tabela 3 - Caracterização química das amostras de solo utilizadas nos experimentos agronômicos

pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m
$\text{CaCl}_2$	$\text{g dm}^{-3}$	$-\text{mg dm}^{-3}-$					$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$				$\text{-----}\%$	
4,0	16	1	6	0,5	1	1	8	30	2,5	32,5	8	76

A caracterização granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997), os resultados sendo: 680, 20 e 300  $\text{g kg}^{-1}$  de areia, silte e argila, respectivamente. A classificação textural foi realizada de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, obtendo-se classe de textura média (EMBRAPA, 1999).

A curva de resposta foi realizada utilizando 3 kg de terra em cada vaso plástico e a calagem foi feita para elevar a saturação por bases para 60% (RAIJ; QUAGGIO, 1983). As amostras de terra incubaram com calcário (PRNT = 91,8%) por aproximadamente 15 dias, período em que foi mantida a umidade da terra adequada (60% da capacidade de campo) para que as reações de neutralização da acidez ocorressem satisfatoriamente. Foi utilizado o delineamento

de blocos completos ao acaso, sendo composto por cinco doses de P e três repetições, totalizando quinze unidades experimentais.

A fonte de P utilizada, o fosfato monocálcico (considerado como fonte padrão de P solúvel em água), foi misturada com a terra em quantidades de acordo com as doses correspondentes a 0; 12,5; 25; 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> P nos vasos. A adubação básica consistiu de 200 mg kg<sup>-1</sup> N na forma de uréia e 200 mg kg<sup>-1</sup> K na forma de KCl em mistura com o volume total de terra no vaso. Foi adicionada uma solução contendo: 5 mg kg<sup>-1</sup> B (ácido bórico p.a.), 10 mg kg<sup>-1</sup> Fe (sulfato ferroso amoniacal p.a.), 10 mg kg<sup>-1</sup> Mn (sulfato de manganês monohidratado p.a.), 10 mg kg<sup>-1</sup> Zn (sulfato de zinco p.a.), 5 mg kg<sup>-1</sup> Cu (sulfato de cobre pentahidratado p.a.) e 1 mg kg<sup>-1</sup> Mo (molibdato de amônio p.a.).

A homogeneização das amostras correspondentes a cada tratamento foi feita manualmente, em sacos plásticos, retornando as amostras aos vasos plásticos.

Foram semeadas seis sementes de milho por vaso, e as plântulas foram desbastadas para duas por vaso aproximadamente dez dias após a emergência. A terra nos vasos foi umedecida com água destilada de forma a manter 60% da capacidade de campo durante a condução do experimento.

As plantas foram colhidas aproximadamente 40 dias após a emergência, secas em estufa a 60° C e pesadas.

O parâmetro avaliado foi matéria seca produzida pela parte aérea das plantas de milho em função das doses de P aplicadas (Figura 2). Os dados originais estão disponíveis no apêndice.

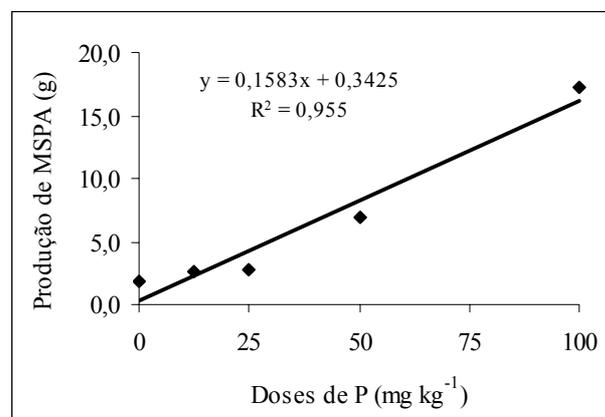


Figura 2 – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho em função de doses de P aplicadas (curva de resposta)

De acordo com os resultados obtidos foi definida a dose de  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  de P total para utilização nos ensaios com os compostos produzidos pelo equipamento Humifert. Essa definição foi baseada na resposta das plantas. Com a dose de  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  de P foi obtida produção satisfatória, porém inferior à máxima observada.

Com o objetivo de avaliar a eficiência agrônômica dos compostos obtidos a partir do processo Humifert, foram realizados dois experimentos, sendo ambos conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP. Os tratamentos foram definidos de forma que todas as possibilidades de mistura fossem contempladas, com o objetivo de investigar qual material ou mistura disponibilizaria mais fósforo às plantas. Além disto, o delineamento permitiria excluir possível efeito da adição somente da matéria orgânica, sendo então válido avaliar o efeito real da forma de P contida no produto final ou da interação deste com a presença de matéria orgânica.

#### **A) Ensaio com rocha fosfática de Patos de Minas e turfa**

Esse ensaio envolveu 10 tratamentos, com quatro repetições, totalizando 40 unidades experimentais, obedecendo ao delineamento de blocos casualizados. Como fontes de fósforo foram utilizados o fosfato monocálcico p.a. (FMC - fonte padrão de P) e a RF de Patos de Minas (PM) e como material orgânico foi utilizada a turfa (T), submetidos (PH) ou não ao processo Humifert (Tabela 4). Os materiais que foram submetidos ao processo Humifert foram expostos ao equipamento por um período de tempo de 16 horas, definido nos testes de tempo de exposição das misturas.

A calagem foi realizada individualmente nos vasos, com o objetivo de elevar a saturação por bases das amostras de solo para 60%. As amostras de solo foram incubadas por aproximadamente 15 dias, período em que foi mantida a umidade em cerca de 60% da capacidade de campo.

As quantidades de material fosfático aplicado nos tratamentos, passados ou não pelo processo, foram estipuladas de modo a fornecer a dose de P definida no experimento de curva de resposta, ou seja,  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  de P total da mistura ou RF aplicada isoladamente. A quantidade de material orgânico, quando aplicado isoladamente, foi definida em função da quantidade desse material fornecida na mistura Humifert para suprir a dose de P estipulada. Posteriormente à aplicação dos tratamentos foi realizada a adubação básica, que consistiu de  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  de N e

200 mg kg<sup>-1</sup> de K. Foi adicionada solução de micronutrientes contendo os mesmos teores da solução aplicada no experimento de curva de resposta. Os nutrientes foram aplicados em mistura com o volume total de terra no vaso.

Foram semeadas seis sementes de milho por vaso, e desbastadas para duas por vaso dez dias após a emergência. A terra nos vasos foi umedecida com água destilada de forma a manter em torno de 60% da capacidade de campo durante a condução do experimento.

O experimento foi conduzido no período de 25/08/2005 a 27/10/2005, data em que as plantas foram colhidas e secas em estufa a 60°C, até atingirem peso constante. Posteriormente, foram pesadas para obtenção da produção de matéria seca.

Assim, o parâmetro avaliado foi matéria seca produzida pela parte aérea das plantas de milho e, posteriormente, foi calculada a eficiência agrônômica da rocha fosfática de Patos de Minas em relação à fonte de elevada solubilidade em água (FMC), denominada, portanto, eficiência agrônômica relativa (EAR), a qual foi obtida a partir da seguinte equação:

$$EAR_i = \frac{Y_i}{Y_{FMC}} * 100$$

onde  $Y_i$  = produção de matéria seca pela fonte  $i$ , e  $Y_{FMC}$  = produção de matéria seca pela fonte padrão, o FMC.

Os dados de matéria seca foram submetidos ao teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, com o objetivo de avaliar se houve diferença significativa para a variável em função dos materiais aplicados (tratamentos).

Tabela 4 – Tratamentos do ensaio com a rocha fosfática (RF) de Patos de Minas (PM) e turfa (T)

Tratamento	Fonte	Observação
1	testemunha	sem aplicação de P
2	FMC	fosfato monocálcico
3	PM	RF de PM sem processo <sup>(1)</sup>
4	PMPH	RF de PM com processo <sup>(2)</sup>
5	T	turfa sem processo
6	TPH	turfa com processo
7	PMPH+T	RF de PM com processo + turfa sem processo
8	PM+TPH	RF de PM sem processo + turfa com processo
9	PMT	RF de PM sem processo + turfa sem processo
10	PMPH+T	RF de PM e turfa passados juntos pelo processo <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento.

### **B) Ensaio com fosfato reativo de Arad, rejeito de Tapira e turfa**

Este ensaio teve por objetivo avaliar a eficiência agrônômica das rochas fosfáticas de Arad e rejeito de Tapira, comparando ao fosfato monocálcico, submetidos ou não ao processo Humifert, na presença ou ausência da turfa, na dose de P estabelecida, além de avaliar o efeito residual das fontes.

As recomendações de calagem e adubação básica e a aplicação dos tratamentos obedeceram ao ensaio anterior. A calagem foi realizada individualmente nos vasos, com o objetivo de elevar a saturação por bases das amostras de solo para 60%. As amostras de solos foram incubadas por aproximadamente 15 dias, período em que foi mantida a umidade em torno de 60% da capacidade de campo. Posteriormente, foi realizada a adubação básica das amostras de solo e foram aplicados os tratamentos. As adubações básicas foram realizadas anteriormente à semeadura do milho, da braquiária e a cada corte da braquiária para cultivo subsequente.

Os tratamentos envolveram três fontes de P (FMC, utilizado como fonte padrão de P, rocha fosfática de Arad - A, e material rejeitado da mina de Tapira - Tap), turfa como material orgânico (T), presença (PH) ou ausência do processo Humifert, uma dose de P ( $75 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, que foi definida no experimento de curva de resposta) e controle (sem aplicação de P). As fontes de P foram aplicadas somente na ocasião da instalação do ensaio, antes da semeadura do milho, de maneira a permitir a avaliação do efeito residual das fontes com a cultura da braquiária (três cortes). O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. A tabela 5 apresenta como foram distribuídos os tratamentos.

As quantidades de material fosfático aplicadas, passados ou não pelo processo, foram estipuladas de modo a fornecer  $75 \text{ mg kg}^{-1}$  de P, calculada em função do teor total de P da mistura ou rocha fosfática aplicada isoladamente. A quantidade de material orgânico aplicada foi definida em função da quantidade desse material fornecida na mistura Humifert para suprir a dose de P estipulada.

O experimento foi constituído de 60 unidades experimentais (20 tratamentos x 3 repetições) e conduzido no período de 10/04/2006 a 04/02/2007. Foram realizados quatro cultivos sucessivos, sendo o primeiro com milho e os três demais com braquiária, com o objetivo de avaliar o efeito residual das fontes, o que se constitui em importante informação para o manejo dos fertilizantes em diferentes sistemas de cultivo. O primeiro cultivo foi realizado de 09/05 a 18/06/2006, data em que foram colhidas as plantas de milho. O primeiro cultivo da braquiária foi

durante o período 11/08 a 10/11/2006, quando ocorreu o primeiro corte. O segundo cultivo da braquiária foi de 11/11 a 20/12/2006 (segundo corte), e de 21/12/2006 a 04/02/2007 foi conduzido o terceiro cultivo (terceiro corte).

Os materiais vegetais foram cortados, secos em estufa a 60°C até atingirem peso constante e obtida a produção de matéria seca da parte aérea das plantas. Os dados foram submetidos ao teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, com o objetivo de avaliar se houve diferença significativa para a produção de matéria seca entre os materiais aplicados. Posteriormente, foi calculada a eficiência agrônômica das fontes alternativas em relação à fonte de elevada solubilidade em água (FMC) utilizando a equação de EAR do experimento anterior.

Tabela 5 – Tratamentos do ensaio com a rocha fosfática (RF) de Arad (A), rejeito de Tapira (Tap) e turfa (T)

<b>Tratamento</b>	<b>Fonte</b>	<b>Observação</b>
1	testemunha	sem aplicação de P
2	FMC	fosfato monocálcico
3	FMC + T	FMC sem processo + turfa sem processo
4	FMC + TPH	FMC sem processo + turfa com processo
5	A	RF de Arad sem processo <sup>(1)</sup>
6	APH	RF de Arad com processo <sup>(2)</sup>
7	A + T	RF de Arad sem processo + turfa sem processo
8	A + TPH	RF de Arad sem processo + turfa com processo
9	APH + T	RF de Arad com processo + turfa sem processo
10	APH + TPH	RF de Arad com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>
11	ATPH	RF de Arad e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>
12	T	turfa sem processo
13	TPH	turfa com processo
14	Tap	Tapira sem processo
15	TapPH	Tapira com processo
16	Tap + T	Tapira sem processo + turfa sem processo
17	Tap + TPH	Tapira sem processo + turfa com processo
18	TapPH + T	Tapira com processo + turfa sem processo
19	TapPH + TPH	Tapira com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>
20	TapTPH	Tapira e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> mistura manual dos materiais; <sup>(4)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento.

### 3.2.2 Resultados e Discussão

#### 3.2.2.1 Produção dos compostos – testes de tempo de exposição dos materiais

Através dos resultados da tabela 6 pode-se observar que houve incremento na solubilidade dos materiais com a exposição ao equipamento. Por exemplo, a mistura de Patos de Minas com turfa apresentou aumento de solubilidade em ácido cítrico de 2,4% (1,7 para 4,1%) quando foi submetida às reações por 12 horas em relação à mistura *in natura*. Para a mistura do fosfato reativo de Arad com turfa o aumento foi de 3,4% (2,7 para 6,1%) depois de submetida à 16 horas ao reator. Entretanto, esses incrementos em solubilidade foram inferiores ao esperado e considerados pequenos e isso se deve, provavelmente, à criação de canal preferencial de passagem dos gases pela mistura, acarretando em baixa eficiência de solubilização no reator. Outra explicação para esse fato pode ser a rápida passagem dos gases pela mistura dentro do reator, sendo imediatamente liberados para recipientes reservados para neutralização desses, impossibilitando maior tempo de contato e, conseqüentemente, reação dos componentes da mistura com o ácido formado na superfície da mistura.

Tabela 6 – Resultados de solubilidade em diversos extratores dos materiais em função do período de exposição ao equipamento Humifert

Materiais	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)				
	Total	Solúvel em			Água
		AC	CNA + água	CNA + água / Total (%)	
PMT 0	7,1	1,7	0,3	4,2	0
PMT 12	9,7	4,1	2,8	28,6	1,7
PMT 16	9,8	4,8	3,7	38,0	2,0
PMT 35	6,8	2,6	1,3	19,0	0,3
AT 0	7,5	2,7	1,3	17,3	0
AT 16	8,4	6,1	2,4	28,7	0
AT 35	7,9	6,2	2,5	31,4	0,1
TapT 16	1,8	0,4	0,2	12,5	0

PMT = Patos de Minas + Turfa submetidos juntos ao equipamento; AT = fosfato reativo de Arad + Turfa submetidos juntos ao equipamento; TapT = rejeito de Tapira + Turfa submetidos juntos ao equipamento; 0 = sem exposição ao equipamento Humifert e 12, 16 e 35 são referentes às horas de exposição ao equipamento Humifert.

Verifica-se para a mistura PMT que conforme o período de exposição ao equipamento foi aumentado de 12 para 16 horas houve tendência de pequeno aumento de solubilidade. Entretanto, é possível verificar que conforme aumentou de 16 para 35 horas o tempo de exposição da mistura ocorreu tendência de queda de solubilidade. Uma possibilidade para explicar este fato seria a formação de novos compostos fosfatados de baixa solubilidade, o que é, a princípio, indesejável no processo. Caso isto se mostre verdadeiro em estudos futuros talvez a técnica seja inadequada para elevado aumento de solubilidade por possibilitar a precipitação de tais compostos. Obviamente apenas a experimentação agrônômica poderá guiar o processo, uma vez que a solubilidade é apenas um indicativo da eficiência agrônômica. A presença de dados na literatura confirma que certos compostos insolúveis contendo P podem ser eficientes sob o ponto de vista agrônômico (PROCHNOW et al., 2003).

Para a mistura AT, nota-se que a solubilidade do material praticamente não foi alterada quando o tempo de exposição foi aumentado de 16 para 35 horas.

Para a mistura do material rejeitado de Tapira com turfa não foram realizadas comparações devido ao baixo teor de fósforo desse material.

Dessa maneira foi definido que o tempo de exposição dos materiais utilizados nos ensaios agrônômicos seria de 16 horas.

### **3.2.2.2 Eficiência agrônômica de mistura de rocha fosfática de Patos de Minas com turfa submetidos ao processo Humifert**

Observa-se pelos dados da tabela 7 que houve resposta à adubação fosfatada e que a fonte de P de elevada solubilidade em água (FMC) proporcionou maior produção de matéria seca pelas plantas de milho. A resposta das plantas ao composto Humifert, ou seja, ao material fosfático de Patos de Minas e à turfa submetidos juntos ao processo (PMTPH) foi intermediária, superior ao controle, porém bastante inferior à fonte de elevada solubilidade (24% em relação ao fosfato monocálcico).

Nota-se ter havido diferença significativa entre a produção de MSPA proporcionada pelo composto de interesse (PMTPH) e pela mesma mistura, porém sem passar pelo processo Humifert (PMT), com vantagem para o primeiro, comprovando, portanto, que houve efeito da exposição da mistura ao equipamento Humifert, mesmo que este ainda não tenha sido satisfatório.

Tabela 7 – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho e eficiência agrônômica relativa das fontes de P

Tratamentos	Identificações	MSPA (g)	EAR (%)
Controle	sem aplicação de P	2,0 c	12
FMC	fosfato monocálcico	16,6 a	100
PM	RF de PM sem processo <sup>(1)</sup>	2,5 bc	15
PMPH	RF de PM com processo <sup>(2)</sup>	2,1 c	13
T	turfa sem processo	2,0 c	12
TPH	turfa com processo	2,1 c	13
PMPH + T	RF de PM com processo + turfa sem processo	2,1 c	12
PM + TPH	RF de PM sem processo + turfa com processo	2,0 c	12
PMT	RF de PM sem processo + turfa sem processo	1,9 c	11
PMPH	RF de PM e turfa passados juntos pelo processo <sup>(3)</sup>	3,9 b	24
CV (%)		17,2	

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento. Valores seguidos pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Esses resultados estão de acordo com a baixa solubilidade dos compostos, indicando que o processo foi pouco eficiente em incrementar a eficiência agrônômica do composto, proporcionando produção insatisfatória da cultura e levando a necessidade de mais estudos e, provavelmente, ajuste do equipamento, de forma a aumentar a eficiência das reações.

### 3.2.2.3 Eficiência agrônômica de mistura de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa submetidos ao processo Humifert

Os dados apresentados na tabela 8 permitem avaliar que houve resposta às fontes de P, e que no cultivo do milho a fonte de maior solubilidade (FMC) proporcionou maior produção de MSPA, conforme no experimento anterior. A produção de MSPA das plantas de milho seguiu a ordem geral: fonte de elevada solubilidade (FMC) > rocha fosfática de elevada reatividade (Arad) > material de baixa reatividade (Tap) = material orgânico (turfa) = controle (sem P). Dentro dos dois grupos (FMC e Arad) não houve diferença entre formas de tratamento, sendo a produção de matéria seca definida basicamente pela fonte de P. Por exemplo, para Arad não houve importância no tipo de tratamento quanto ao processo Humifert, ou mesmo da presença ou não de material orgânico.

É reportado que as rochas fosfáticas de elevada reatividade, geralmente de origem sedimentar, apresentam em sua estrutura muitas substituições de carbonatos por fosfatos, o que leva à maior solubilidade e, conseqüentemente maior eficiência agrônômica em determinadas condições de solo, clima, cultura e manejo. As jazidas fosfáticas nacionais são constituídas principalmente de materiais de origem ígnea e de baixa solubilidade e, conseqüentemente, apresentam baixa eficiência agrônômica quando aplicadas *in natura* (ALCARDE; PONCHIO, 1980; GOEDERT; LOBATO, 1980).

Como mencionado anteriormente, não houve diferença significativa quando foi aplicada a rocha fosfática de Arad submetida e não submetida ao processo, mostrando que esse não foi eficiente em aumentar a solubilidade do material, refletindo em produção para o primeiro cultivo.

A aplicação do rejeito de Tapira, independentemente da exposição ao equipamento ou da adição de material orgânico, proporcionou produções muito baixas das plantas de milho, similares a da testemunha. Isso se deve ao fato desse material apresentar teor de P solúvel muito baixo, insuficiente ao desenvolvimento das plantas. Os dados demonstram que também para esta fonte não houve qualquer influência do tratamento Humifert na eficiência agrônômica.

A análise dos dados obtidos com braquiária, primeiro cultivo (Tabela 8), permite verificar um aumento de eficiência do fosfato Arad em relação ao FMC. Enquanto no cultivo de milho houve distinção clara entre FMC e fosfato Arad em todas as situações, com vantagem para o FMC, no primeiro cultivo de braquiária ocorreu uma situação geral de eficiência estatisticamente similar entre as duas fontes. Em termos de EAR observa-se inclusive que para todas as situações de Arad o índice foi numericamente maior no primeiro cultivo de braquiária (49% a 110%) do que aquele do cultivo de milho (39% a 54%). Numericamente ainda, observa-se que em algumas situações a eficiência do fosfato de Arad foi agora similar ao FMC (destacam-se ACH+TSH e ACH+TCH). Outra observação interessante no primeiro cultivo de braquiária é a de que o processo Humifert teve efeito para a fonte Arad, com vantagem para aqueles submetidos ao processo. Contrastes ortogonais entre ASH x ACH e ASH+TSH x ACH+TCH confirmam isto ( $p < 0,05$ ). Para o material de Tapira não houve qualquer efeito de fonte ou tratamento Humifert, pois as produções de MSPA pelas plantas foram iguais ao do controle sem P.

No segundo cultivo de braquiária vários tratamentos não propiciaram o desenvolvimento das plantas, devido a deficiência severa de P (tratamentos envolvendo aplicação apenas de turfa, de Tap e o controle sem P). A análise estatística dos dados remanescentes (FMC e Arad) conduz

a apenas diferença significativa entre ACH versus ASH, com vantagem para ACH, confirmando assim a eficácia do processo Humifert para o fosfato de Arad. A presença de turfa junto ao fosfato natural parece ter interagido positivamente na eficiência da mistura, uma vez que mesmo sem passar pelo processo, o fosfato natural neste caso não diferiu do fosfato com Humifert (ASH+TSH ou ASH+TCH versus ACH).

O terceiro cultivo de braquiária evidenciou condição similar de MSPA para todas as fontes que mantiveram produção até este cultivo. Ao longo dos cultivos observou-se uma evolução da eficiência do fosfato Arad, quando comparado ao FMC. Em alguns casos houve numericamente uma tendência de Arad > FMC, o que, entretanto não se confirmou em termos estatísticos. Como era de se esperar a soma dos três cultivos de braquiária mostra que as fontes FMC e Arad foram superiores aos demais tratamentos (Turfa, Tap ou controle), sem, no geral, diferença significativa entre FMC e Arad. As únicas diferenças existentes entre os tratamentos contendo estas duas fontes evidenciaram que o tratamento do Arad com Humifert elevou a eficiência desta fonte em relação à mesma fonte sem Humifert (ACH ou ACH+TSH > ASH).

Tabela 8 – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho e braquiária e eficiência agrônômica relativa (EAR)

Tratamentos	Milho		Braquiária (efeito residual)						Soma 3 cultivos de braquiária	
			1º cultivo		2º cultivo		3º cultivo			
	MSPA (g)	EAR (%)	MSPA (g)	EAR (%)	MSPA (g)	EAR (%)	MSPA (g)	EAR (%)	MSPA (g)	EAR (%)
Controle	1,7 c	14	0,4 c	2	-	-	-	-	0,4 c	1
FMC SH	12,3 a	100	23,0 a	100	16,5 ab	100	22,5 a	100	62,0 ab	100
FMC SH + TSH	11,6 a	95	19,9 ab	87	17,3 ab	105	22,7 a	101	59,9 ab	97
FMC SH + TCH	12,8 a	104	20,3 ab	88	17,1 ab	104	23,3 a	104	60,7 ab	98
ASH	5,3 b	43	11,4 b	50	13,5 b	82	25,6 a	114	50,5 b	82
ACH	5,8 b	48	16,4 ab	71	21,9 a	133	26,4 a	117	64,7 a	104
ASH + TSH	4,9 b	40	11,3 b	49	19,4 ab	118	22,9 a	102	53,5 ab	86
ASH + TCH	4,8 b	39	18,8 ab	82	19,5 ab	118	23,7 a	105	62,1 ab	100
ACH + TSH	6,6 b	54	25,4 a	110	17,8 ab	108	22,0 a	98	65,2 a	105
ACH + TCH	6,5 b	53	21,1 ab	92	18,0 ab	109	22,1 a	98	61,3 ab	99
ATCH	6,4 b	52	18,6 ab	81	18,8 ab	114	25,9 a	115	63,4 ab	102
TSH	1,3 c	10	0,3 c	1	-	-	-	-	0,3 c	1
TCH	1,5 c	12	0,3 c	1	-	-	-	-	0,3 c	1
TapSH	1,3 c	11	0,3 c	1	-	-	-	-	0,3 c	1
TapCH	1,8 c	15	0,5 c	2	-	-	-	-	0,6 c	1
TapSH + TSH	1,5 c	12	0,5 c	2	-	-	-	-	0,5 c	1
TapSH + TCH	1,4 c	11	0,4 c	2	-	-	-	-	0,4 c	1
TapCH + TSH	1,7 c	14	0,5 c	2	-	-	-	-	0,5 c	1
TapCH + TCH	1,7 c	14	0,7 c	3	-	-	-	-	0,7 c	1
TapTCH	1,7 c	14	0,6 c	3	-	-	-	-	0,6 c	1
DMS	2,01		10,01		7,31		5,81		13,82	
CV (%)	14,0		33,7		26,1		15,8		14,7	

Controle = sem aplicação de P; FMC = fosfato monocálcico; SH = sem exposição ao processo Humifert; CH = com exposição ao processo Humifert; A = fosfato reativo de Arad; T = turfa; Tap = rejeito de Tapira. Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 3.3 Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que houve aumento de eficiência agrônômica das misturas de Patos de Minas e Arad com turfa submetidas ao processo Humifert, em relação à aplicação dos materiais não submetidos ao processo, confirmando a hipótese geral do trabalho. Muito embora isto tenha ocorrido é necessário salientar que o aumento de solubilidade das fontes tratadas pelo processo Humifert (Patos de Minas, Arad e Tapira) foi de pequena magnitude. Os resultados agrônômicos em casa-de-vegetação estão em concordância com os dados de

solubilidade, apontando, em solo de elevada resposta a fósforo, elevada eficiência da fonte padrão, o FMC, e baixa eficiência em geral para os produtos de interesse submetidos ao processo Humifert. Apesar dos dados de efeito residual para braquiária terem indicado um efeito positivo do processo Humifert para o fosfato de Arad, os resultados não confirmam até o momento a expectativa de utilização desta técnica para produção de fontes alternativas de fósforo de forma econômica. Novos estudos são necessários no sentido de otimizar a solubilização do P contido nas misturas. Sugere-se adaptar o reator de forma a permitir maior tempo de contato entre o ácido nítrico nascente e a mistura de interesse.

### Referências

- ALCARDE, J. C.; PONCHIO, C. O. Caracterização das solubilidades das rochas fosfatadas brasileiras e termofosfatos em diferentes extratores químicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 3, p. 196-200, 1980.
- BIDEGAIN, R. **Composition d'un amendement organo-phosphate obtenu par traitement aux oxides d'azote de composes lingo-cellulosiques. Valeur agronomique comparée à un compost**. 1995. 201 p. Thèse (Doctorat en Sciences des Agroressources) - Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 1995.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 2004. 104 p.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.
- FUCHSMAN, C. **Peat industrial chemistry and technology**. New York: Academic Press, 1980. 192 p.
- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 311-318, 1980.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 41-47, 2003.
- NARDI, S.; TOSONI, M.; PIZZEGHELLO, D.; PROVENZANO, M.R.; CILENTI, A.; STRURARO, A.; RELLA, R.; VIANELLO, A. Chemical characteristics and biological activity of organic substances extracted from soils by root exsudates. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 29, p. 2012-2019, 2005.

OBA, C.A.I. **Aproveitamento de materiais fosfáticos marginais para a produção de fertilizantes organo-fosfatados.** 2000. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; CARMONA, G.; HENAO J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 293-302, 2003.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade.** Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31 p. (IAC. Boletim Técnico, 81).

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

ROUQUET, N. **Role des composés humiques sur la dissolution et la cristallisation du phosphate dicalcique dihydrate (Brushite).** 1989. 145 p. Thèse (Doctorat en Sciences des Agroressources) - Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 1989.

SILVEROL, A.C. **Processo Humifert para fertilizantes alternativos organo-fosfatados: obtenção a partir do minério de Angico dos Dias, caracterização dos compostos e avaliação da eficiência agrônômica.** 2006. 179 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Universidade São Paulo, São Paulo, 2006.

#### 4 MODELO DE PREDIÇÃO DO USO DE FOSFATOS NATURAIS EM CONDIÇÕES BRASILEIRAS

##### Resumo

Existem diversos fatores que afetam a eficiência dos fosfatos de rocha e, devido à grande quantidade de pesquisas conduzidas em condições de campo em todo mundo, faz-se necessária a integração desses fatores em um sistema abrangente para compreensão de como esses interferem na eficiência agrônômica dos fosfatos de rocha. O uso de um sistema de suporte de decisão é uma maneira de sanar esse problema. Para tal finalidade foi criado um programa computacional denominado “Phosphate Rock Decision Support System” (PRDSS), desenvolvido em conjunto sob a coordenação do “IFDC – International Center for Soil Fertility and Agricultural Development” e “IAEA – International Atomic Energy Agency”. A função do programa é prever a eficiência agrônômica dos fosfatos de rocha, com praticidade, dando suporte à decisão sobre a utilização dos mesmos, relativamente aos fosfatos de elevada solubilidade em água, em situações específicas de solo, fosfato de rocha, manejo e clima. Para validar a versão atual do programa e aperfeiçoá-lo existe a necessidade de coleta de dados especificamente projetados para tal. Assim, estão sendo desenvolvidos experimentos de campo para validação do PRDSS em seis países (Burkina Faso, Tanzânia, Malásia, Vietnã, Argentina e Brasil). O objetivo específico desse trabalho foi a avaliação dos resultados obtidos no experimento desenvolvido em condições de campo no Brasil, sendo integrado à rede de desenvolvimento do programa. O experimento foi conduzido em Rondonópolis, devido à importância em termos de produção de grãos no Brasil, em Latossolo Vermelho Férrico, que apresentou pH em água de 5,2, teor muito baixo de fósforo e capacidade de fixação de P de 30,4% e 34,5% para as camadas de 0 a 15 cm e 15 a 30 cm, respectivamente. Foram utilizados como fontes de P o superfosfato simples e fosfatos de rocha de Araxá e Gafsa, aplicados a lanço e incorporados em camadas de solo de 15 cm, em doses de 60, 120 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, baseado no teor total de P de cada fonte, além do tratamento controle, ou seja, sem aplicação de P. O superfosfato simples também foi aplicado nas linhas, na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, como tratamento adicional. Foram retiradas amostras de solo da camada de 0 a 15 cm de profundidade após a colheita da cultura para análise de P no solo pelo método da resina trocadora de íons. Os dados de produtividade de grãos de soja foram submetidos à análise estatística considerando fatorial completo (fontes x doses). As relações entre produção de grãos ou P-resina e dose de P aplicada foram analisadas utilizando regressão. Dados de P-resina apontaram que o teor de P disponível foi na ordem RF Gafsa > SSP = RF Araxá, sendo os índices relativos de 317%, 100% e 47%, respectivamente, sugerindo melhor performance da RF de Gafsa em termos de efeito residual. Os resultados de eficiência agrônômica relativa (EAR) obtidos a partir dos dados do campo foram de 100%, 51% e 97% para o SSP, FR Araxá e FR Gafsa, respectivamente. Os valores de EAR previstos pelo PRDSS foram de 33% e 100% para a RF de Araxá e Gafsa, respectivamente, indicando que os dados se ajustaram bem em condições brasileiras.

Palavras-chave: Eficiência agrônômica relativa; Fosfatos naturais; Predição de uso de rochas fosfáticas

## Phosphate rock decision support system in brazilian conditions

### Abstract

Many factors affect the agronomic effectiveness of phosphate rocks (PR). Integrating research results available in a decision support system as to at the end compare the relative agronomic effectiveness (RAE) of the PR to water-soluble P (WSP) sources can be of great value to agriculture decision makers. With this in mind a software called "Phosphate Rock Decision Support System (PRDSS)" was developed in joint collaboration between the "International Center for Soil Fertility and Agricultural Development (IFDC) and the "International Atomic Energy Agency (IAEA). The final objective is to predict the RAE of a specific PR, as related to WSP sources, taking into consideration the soil, the PR characteristics, soil management and local clima. To evaluate the effectiveness of the PRDSS software experiments were idealized to be conducted in different countries of the world (Burkina Faso, Tanzania, Malasia, Vietnam, Argentina and Brazil). This work targeted in the experiment in Brazil. The experiment was conducted in Rondonopolis, MT, due to the importance of this agricultural area, in an Oxisol with pH 5.2 in water, very low content of bioavailable P and 30.4% - 34.5% of P adsorption capacity in the 0-15 and 15-30 cm soil layer, respectively. The P sources utilized were the single superphosphate (SSP), the Araxa PR and the Gafsa PR, all applied broadcasted to the soil into the first 15 cm soil layer, in rates of 60, 120 and 240 kg ha<sup>-1</sup> of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A control with no P was added for each P source. Also, an extra treatment with banded 120 kg ha<sup>-1</sup> of total P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> was included as to compare this source of P when broadcasted versus banded. The crop was soybean. Soil samples were taken and analyzed by the P-resin method after the crop was harvested. Data obtained was statistically analyzed and interpreted considering a factorial P sources versus P rates. Also, and most importantly, the relation of yield of soybean or P-resin against the P rate applied to the soil was performed using regression procedures by the SAS software. The results for P-resin indicated the order of Gafsa > SSP > Araxa PR, with relative indexes of 317%, 100% and 47%, respectively, suggesting a possible higher effectiveness of Gafsa PR in future crops. The results for RAE for soybean at field condition were of 100%, 51% and 97% for the SSP, Araxa PR and Gafsa PR, respectively. The RAE predicted by the PRDSS were of 33% and 100% for Araxa PR and Gafsa PR, respectively, which can be considered good estimates of the real RAE at Brazilian conditions, and initially attesting the feasibility of this software for future use.

Keywords: Relative agronomic effectiveness; Phosphate rock; Prediction of use of phosphate rocks

### 4.1 Introdução

A deficiência em fósforo (P) é elevada na maior parte dos solos do mundo, e em especial nas condições brasileiras, de tal forma que sem a aplicação de fertilizantes que contenham P investimentos em outras tecnologias se tornam ineficientes. As fontes de P mais utilizadas são

fosfatos acidulados de elevada solubilidade em água, tais como superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), monoamônio fosfato (MAP) e diamônio fosfato (DAP).

Aplicação direta ao solo de rochas fosfáticas (RF) pode se constituir em alternativa de interesse agrônomo, em relação à utilização de fontes de fósforo de elevada solubilidade em água, em solos com condições de acidez de regiões tropicais ou subtropicais (LEON; FENSTER; HAMMOND, 1986; CHIEN; MENON, 1995). Além disso, recentemente, atenção especial tem sido dada mundialmente às RFs por serem fontes aceitas na “agricultura orgânica” e ainda pela possibilidade de reduzirem o impacto ambiental no que diz respeito à eutrofização de mananciais de águas em regiões vulneráveis, em comparação as fontes solúveis em água (HART; QUIN; NGUYEN, 2004; SHIGAKI; SHARPLEY; PROCHNOW, 2007).

Inúmeros são os depósitos de RF disponíveis no mundo, sendo distintas as condições de cada um, em função da sua geologia, em providenciar fósforo ao desenvolvimento das culturas quando em condição natural (apenas moagem). As rochas fosfáticas são comercializadas de forma local ou exportadas para outros países. Por exemplo, no Brasil é comum importação de RF do Oriente Médio (entre outros: Gafsa, Arad e Daoui).

Os principais fatores relacionados à eficiência agrônoma das RFs são: (i) propriedades químicas e físicas da RF que afetam a sua reatividade, (ii) propriedades do solo, (iii) manejo do solo, (iv) clima, e (v) cultura (CHIEN; MENON, 1995).

Muito embora inúmeros estudos em condições de campo tenham sido conduzidos no mundo para avaliar a eficiência agrônoma das diferentes RF, existe ainda a necessidade de integrar todos os fatores em modelo (sistema) que possa antecipar a eficiência agrônoma das RF, possibilitando assim condições para se decidir sobre a viabilidade de utilização em situações específicas de RF, solo, manejo, clima e cultura. O desenvolvimento de um “software” que possa agregar todas as informações obtidas e estimar a eficiência agrônoma da RF disponível em condições agrômicas mais amplas que as tentativas anteriores é uma necessidade (SMALLBERGER et al., 2006).

Tendo isto em vista, uma união de esforços está resultando no desenvolvimento de um programa computacional denominado “Phosphate Rock Decision Support System” (PRDSS), ou “Sistema de Suporte para Decisão quanto ao uso de Rocha Fosfática”. Este programa procura levar em consideração, de forma simples, todos os aspectos envolvidos na eficiência da RF (características químicas e físicas do material, propriedades do solo, cultura, manejo do solo e

condições climáticas), o que o distingue de programas anteriores que enfatizaram a utilização de fontes de elevada reatividade para pastagem (GILLARD; SALE; TENNAKOON, 1997; METHERELL; PERROT, 2003) e modelos que exigem a entrada de dados de forma complexa (WATKINSON, 1994; NYE; KIRK, 1987).

O programa está sendo desenvolvido em conjunto sob a coordenação do “IFDC – An International Center for Soil Fertility and Agricultural Development” e “IAEA – International Atomic Energy Agency” pela expansão de versão preliminar desenvolvida por Singh et al. (2003), na qual apenas a solubilidade da RF, pH do solo e cultura eram as variáveis consideradas. As instituições citadas coordenam ações para a confecção do modelo matemático a partir de dados disponíveis na literatura ou fornecidos por colaboradores de várias partes do mundo. Os detalhes sobre os fatores para calcular os componentes, bem como o conjunto de dados necessários (essenciais e secundários) para rodar o modelo, encontram-se na figura 1.

O conjunto mínimo de dados necessários para o PRDSS calcular uma predição da eficiência agrônômica relativa (EAR) é RF, cultura e pH do solo. Se o usuário fornecer outros dados, a EAR é multiplicada por fatores relacionados com carbono orgânico, umidade, adsorção de fósforo pelo solo e lixiviação, dando origem a uma nova e mais segura predição. Uma última rodada de cálculos é feita baseada na saturação de alumínio do solo e o conteúdo de carbonato livre da RF, dando origem então a EAR final. Uma análise econômica é possível através do fornecimento dos preços dos fertilizantes envolvidos, ou seja, a fonte solúvel em água e a RF em questão (SMALLBERGER et al., 2006). O programa computacional agrega informações da literatura através de modelos matemáticos simples, os quais encontram-se resumidos nas tabelas 1A a 1E.

O PRDSS deverá se transformar em um instrumento prático para pesquisadores, extensionistas, agricultores, vendedores e governantes. A intenção é que o programa seja disponibilizado através da internet a todos os interessados em decidir, baseado na EAR, se determinada RF, em determinada área agrícola, é um substituto aos fertilizantes solúveis em água.

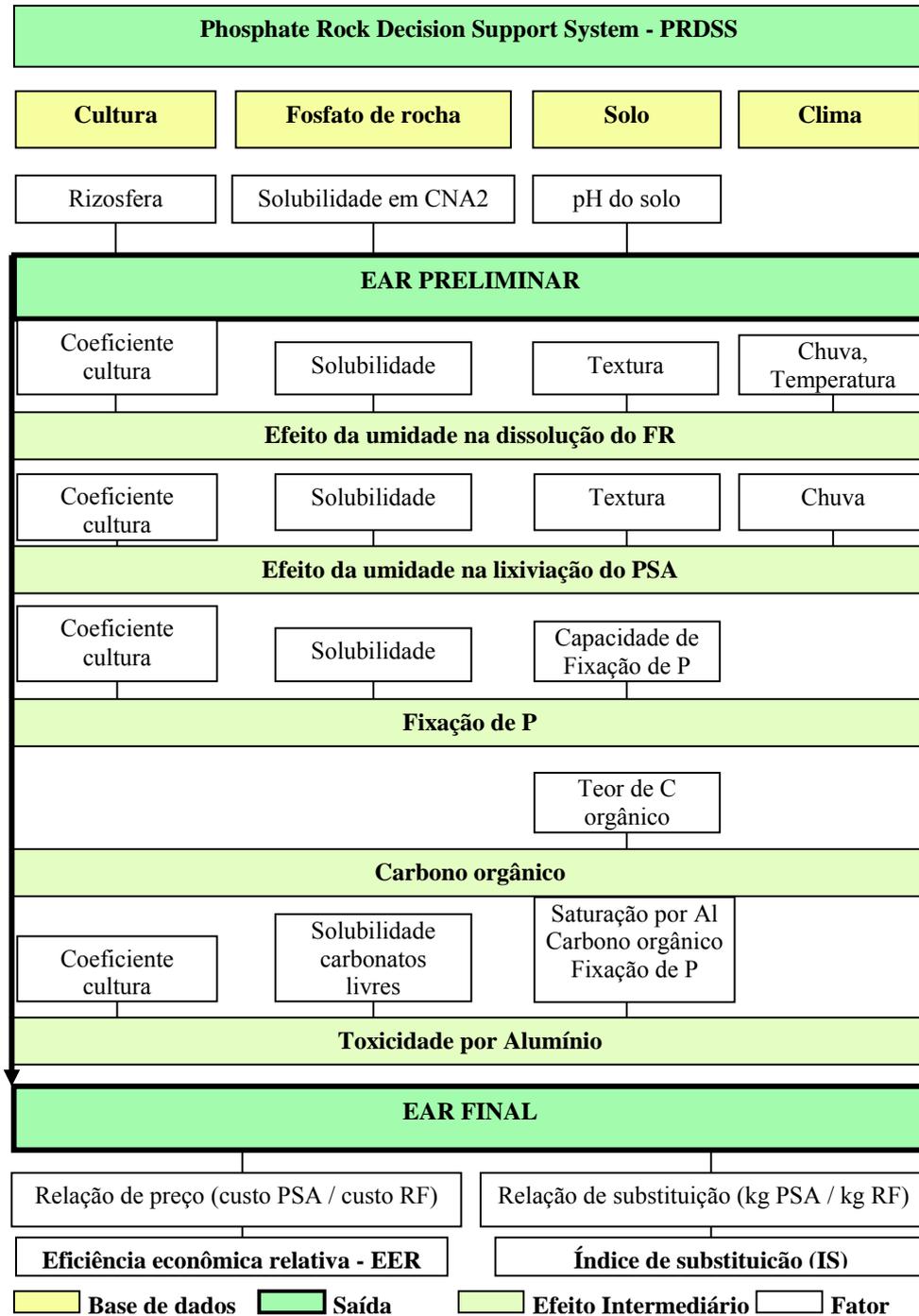


Figura 1 – Representação esquemática de todos os componentes, fatores e processos no PRDSS (Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006). CNA2 = segunda extração em citrato neutro de amônio; EAR = Eficiência Agronômica Relativa; RF = rocha fosfática; PSA = fertilizante fosfatado solúvel em água

Tabela 1A – Fórmulas e fatores utilizados pelo PRDSS para o cálculo da eficiência agrônômica relativa (EAR). Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006

Índice	Fórmula	Definições dos componentes da fórmula	Objetivo	Referência
EAR (%)	$EAR(\%) = \left[ \frac{Y_{RF} - Y_0}{Y_{PSA} - Y_0} \right] * 100$	Y <sub>RF</sub> , Y <sub>0</sub> e Y <sub>PSA</sub> = produtividade com RF, testemunha sem P e PSA, respectivamente	Calcula a EAR para uma dose específica de P aplicado	
EAR (%)	$EAR(\%) = (\beta_{RF} / \beta_{PSA}) * 100$	$\beta_{RF}$ e $\beta_{PSA}$ = coeficiente angular de equação de regressão para dados ajustados para a RF e PSA, respectivamente	Calcular a EAR para doses múltiplas de P aplicado com ajuste de modelos de regressão similares para as fontes de P <sup>1</sup>	Chien et al. (1990)
Y <sub>CNA2</sub>	$Y_{CNA2} = 0,133 + 0,302X_{AF}, n = 50, R^2 = 0,92$ $Y_{CNA2} = 0,294 + 0,649X_{AC}, n = 70, R^2 = 0,92$	Y <sub>CNA2</sub> = solubilidade da RF em CNA2 em % de P da rocha, X <sub>AF</sub> e X <sub>AC</sub> solubilidade da RF em AF e AC em % P da rocha	Transformar a solubilidade da rocha em AF ou AC em solubilidade em CNA2	
Y <sub>G</sub>	$Y_G = 0,320 + 1,210x_{UG}; R^2 = 0,91$	Y <sub>G</sub> = solubilidade da RF finamente moído, em % de P da rocha; x <sub>UG</sub> = solubilidade da RF na forma comercializada (farelada), em % de P da rocha	Estimar a solubilidade em CNA2 da RF a partir do valor de solubilidade obtido com granulometria mais grosseira. Equação utilizada para RF com elevada reatividade	

<sup>1</sup> Modelos normalmente empregados em curvas de resposta a P são do tipo:

$$Y_i = \alpha + \beta \ln(x_i);$$

$$Y_i = \alpha + \beta (x_i)^{0,5};$$

em que,

Y<sub>i</sub> = Produção obtida com FR ou PSA;

α = Produção obtida sem a aplicação de P ou intercepto do modelo ajustado;

β = Coeficiente de regressão para o FR ou PSA;

x<sub>i</sub> = Doses de P aplicadas.

Tabela 1B – Fórmulas e fatores utilizados pelo PRDSS para o cálculo da eficiência agrônômica relativa (EAR). Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006

pH <sub>H2O</sub>	$Y_{H2O} = -0,783 + 1,69x - 0,064x^2$ R <sup>2</sup> =0,96	Y <sub>H2O</sub> = pH em água; x = pH em KCl	Converter os valores de pH obtidos com KCl para pH em água	Leon et al. (1986) Singh, (1985)
Y <sub>FMP</sub>	$Y_{FMP} = \frac{90}{1,0 + \exp\left[-\frac{(X_{CNA2} - 2,578)}{0,7217}\right]}$ ; R <sup>2</sup> =0,92	Y <sub>FMP</sub> = fixação mínima de P influenciando a redução na EAR da RF, em percentagem; x <sub>CNA2</sub> = solubilidade da RF na segunda extração com CNA, em % na rocha.	Calcular a redução na EAR da RF em função da capacidade de fixação de P do solo e da solubilidade da RF na segunda extração com CNA	
Y <sub>DFP</sub>	$Y_{DFP} = 0,2643 + 0,552x_{CNA2} + 0,0238x_{CNA2}^2 - 0,0219x_{CNA2}^3$ ; R <sup>2</sup> = 0,89	Y <sub>DFP</sub> = declividade da redução na EAR com a fixação de P, com base na solubilidade da RF; x <sub>CNA2</sub> = solubilidade do FR na segunda extração com CNA, em % na rocha.	Estimar a declividade relacionada a redução na EAR da RF em função da Capacidade de Fixação de P, para um dado valor de solubilidade em CNA <sub>2</sub> .	Leon et al., (1986) Mokwunye e Hammond, 1992
Y <sub>CFPF</sub>	$Y_{CFPF} = 0,390 + 0,0284x_{CFPFK}$ ; n = 21; R <sup>2</sup> = 0,83	Y <sub>CFPF</sub> = Capacidade de fixação de P, em percentagem, pelo método de Fassbender; x <sub>CFPFK</sub> = Capacidade de Fixação de P, em mg kg <sup>-1</sup> , obtido com o método de Fox e Kamprath	Relacionar os dois métodos de determinação da CFP e converte os valores obtidos com o método de Fox & Kamprath para o método de Fassbender, que é o utilizado no sistema.	Fassbender e Igue, 1967 Fox e Kamprath, 1970
Y <sub>FCOandisols</sub>	$Y_{FCOandisols} = 0,98 + 0,05 \ln x$	Y <sub>FCOandisols</sub> = fator de ajuste para a EAR da RF, para os Andisols; x = Carbono orgânico, em percentagem	Calcular o fator que relaciona a EAR da RF e o teor de C orgânico no solo	
Y <sub>FCO</sub>	$Y_{FCO} = 0,92 + 0,045 \ln x$	Y <sub>FCO</sub> = fator de ajuste para a EAR da RF, para as demais classes de solo; x = Carbono orgânico, em percentagem	Idem ao anterior	

Tabela 1C – Fórmulas e fatores utilizados pelo PRDSS para o cálculo da eficiência agrônômica relativa (EAR). Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006

$Y_{EA1\%}$	$Y_{EA1\%} = AI\% \cdot (x_{FP} / x_{CO})$ $x_{FP} = 1,1 - 0,0001(z_{FP})^2$ $x_{CO} = 1,0 + 0,1 \cdot \ln(z_{CO})$ <p>Condições utilizadas no modelo:  <math>x_{FP} \leq 1</math>;  <math>x_{OC} \geq 1</math>;  <math>Y_{EA1\%} \leq 15\%</math>            Para <math>Y_{EA1\%} &gt; 15\%</math>, utiliza-se equações baseadas na tolerância da espécie em cultivo à saturação por Al</p>	$Y_{EA1\%}$ = Saturação por Al efetiva, em %; $x_{FP}$ = Influência da fixação de P na saturação por Al efetiva (%) $x_{OC}$ = Influência do Carbono Orgânico na Saturação por Al efetiva (%) $z_{PF}$ = Capacidade de fixação de P do solo (%) $z_{OC}$ = Teor de C orgânico do solo (%)	<p>Calcular a Saturação por Al denominada como efetiva, pois, as equações consideram a interação da saturação por Al com a CFP e com o C.O.</p>	
$Y_{AICL}$	$Y_{AICL} = \alpha_{AIC} - [2,3x_{CNA2} \cdot z_{CL} \cdot (0,03 + 0,02985 \ln z_{CL})]$	$Y_{AICL}$ = Modificação na EAR baseada no EAls e conteúdo de carbonato livre da RF (%) $\alpha_{AIC}$ = Alteração na EAR devido a EA1% (efeito de solo e de cultura) (%) $z_{CL}$ = Carbonatos livres na RF (%) $x_{CNA2}$ = solubilidade do FR na segunda extração com CNA, em % na rocha.	<p>Considerar o efeito dos Carbonatos livres (CL) da RF na neutralização de parte do Al tóxico.</p>	

Tabela 1D – Fórmulas e fatores utilizados pelo PRDSS para o cálculo da eficiência agrônômica relativa (EAR). Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006

$Y_U$	$Y_U = X_{PrT} / X_{PM}$ $X_{PrT} = 1,1 Z_R$ $X_{PM} = 600 * X_{IU} * X_{DU} * X_{EAR}$ $X_{IU} = 0,46 + \exp(-0.032Z_A)$ $X_{DU} = 2 * \exp(-0.0325Z_{DU})$	<p><math>Y_U</math> = Efeito da umidade do solo na dissolução da RF (valor entre 0,0 e 1,0)</p> <p><math>X_{PrT}</math> = Precipitação total no período entre a aplicação da RF e a colheita</p> <p>1.1. = 10% de aumento de chuva para contabilizar pelo tempo da aplicação do P a semeadura</p> <p><math>X_{PM}</math> = valor mínimo de precipitação obtido com a equação ou considerando o valor de 450 mm</p> <p><math>X_{IU}</math> = Índice de umidade calculado com base no conteúdo de areia</p> <p><math>X_{DU}</math> = Índice de umidade calculado com base na percentagem de dias úmidos durante o período de condução das culturas</p> <p><math>X_{EAR}</math> = Estimativa preliminar de EAR</p> <p><math>Z_R</math> = Chuva (mm) na localidade específica durante a estação de crescimento (semeadura a colheita)</p> <p><math>Z_A</math> = Percentagem de areia no solo</p> <p><math>Z_{DU}</math> = Percentagem de dias úmidos durante o ciclo da cultura calculado como o (número de dias úmidos)/(número de dias do ciclo da cultura)</p>	<p>Seqüência de equações utilizadas para estimar a dissolução da RF em função do regime pluviométrico da região durante o ciclo da cultura.</p>	
-------	--	---	---	--

Tabela 1E – Fórmulas e fatores utilizados pelo PRDSS para o cálculo da eficiência agrônômica relativa (EAR). Adaptado de SMALLBERGER et al., 2006

Y <sub>LPSA</sub>	$Y_{REL} = 1.0 + \{x_{LR} / [1.0 + \exp - ((x_{PT} - x_{LT}) / 300)]^{40}\}$ $x_{LR} = -0.008 x_{EAR} + 1$ $x_{LT} = 1500 - 19 z_S \text{ ou } x_{LT} = 50 + 16 z_C$	<p>Y<sub>LPSA</sub> = Efeito da Precipitação pluvial na lixiviação do PSA (<math>\geq 1,0</math>)</p> <p>x<sub>LR</sub> = Efeito da EAR calculada na forma preliminar (solubilidade da RF, pH do solo, cultura) na dissolução da RF</p> <p>x<sub>EAR</sub> = valor estimado de EAR preliminar (%)</p> <p>x<sub>LT</sub> = Fator para a influência da textura do solo na lixiviação</p> <p>x<sub>PT</sub> = Precipitação total no período entre a aplicação da RF e a colheita (Ver Yu)</p> <p>z<sub>S</sub>, z<sub>C</sub>, z<sub>R</sub> = Valores específicos para solo quanto a areia (%), argila (%) e chuva (mm)</p>	Determinar a lixiviação do PSA em relação à RF	Godwin & Singh (dados não publicados) Gillard et al., 1997
Y <sub>FP</sub>	$Y_{FP} = (x_{FMP} * x_{DFP}) - (x_{DFP} * z_{CCFP})$	<p>Y<sub>FP</sub> = Fator para fixação de P</p> <p>x<sub>FMP</sub> = Fixação mínima de P a partir da qual correrá redução na EAR, em percentagem (Ver Y<sub>FMP</sub>)</p> <p>x<sub>DFP</sub> = declividade da redução na EAR com a fixação de P (ver Y<sub>DFP</sub>)</p> <p>z<sub>CCFP</sub> = Coeficiente da cultura para fixação de P (Tabela 4)</p>	Determinar o fator final para a fixação de P, utilizando alguns parâmetros determinados anteriormente e a capacidade das diferentes espécies em utilizar o P em função da capacidade de fixação de P do solo	
EER	$EER = EAR \times \frac{\text{Custo do PSA/kg de P}}{\text{Custo da RF/kg de P}} \div 100$	<p>EER = Eficiência econômica relativa</p> <p>EAR = Eficiência agrônômica relativa estimada pelo PRDSS</p>	Calcular a Eficiência Econômica Relativa	Engelstad et al. (1974)

No sentido de validar e melhorar o protótipo do PRDSS, experimentos em condições de campo foram estabelecidos em vários países para coletar dados especificamente delineados para o projeto (Burkina Faso, Tanzânia, Malásia, Vietnã, Argentina e Brasil).

Este trabalho é integrado à rede de desenvolvimento do PRDSS e teve por objetivo específico a análise de um experimento em condições de campo no Brasil para avaliar a eficiência agrônômica de dois fosfatos naturais em relação a um padrão de elevada solubilidade em água e, ainda, fornecer dados para testar e melhorar o PRDSS.

A hipótese testada foi a de que os dados de eficiência agrônômica obtidos em experimento em condições de campo no Brasil corresponderão aproximadamente aos índices obtidos pelo modelo “Phosphate Rock Decision Support System - PRDSS”.

## **4.2 Desenvolvimento**

### **4.2.1 Material e Métodos**

Inicialmente foram investigados três locais experimentais, situados em Rondonópolis, MT, devido à grande importância em termos de produção de grãos no Brasil (Fazenda Varija, São Carlos e Santa Maria), com o objetivo de encontrar uma área com os seguintes requisitos em termos de solo: pH em água menor do que 5,3 e baixo teor de fósforo disponível.

A área escolhida está localizada na Fazenda Santa Maria e a tabela 2 resume os dados de análises químicas e físicas baseados em métodos usados no Departamento de Ciência do Solo/ESALQ-USP. O pH do solo foi determinado em solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  na relação de 1:2,5. O fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram extraídos com resina trocadora de íons, e a quantificação de P e K foi feita por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. A determinação do Ca e Mg foi efetuada através da técnica de espectrometria de absorção atômica. Para extração do enxofre utilizou-se uma solução de fosfato de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  e a quantificação foi por turbidimetria. A extração do carbono foi feita através do uso de dicromato de sódio e a quantificação pelo método colorimétrico. A caracterização química foi baseada em procedimentos analíticos descritos por Rajj et al. (2001) e a caracterização granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997),

A capacidade de fixação de fósforo foi medida pelo método de Fassbender (FASSBENDER; IGUE, 1967), que consiste em agitar 10 gramas de solo com 200 mL de

$\text{KH}_2\text{PO}_4$ , contendo  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de P por 6 horas, para obter, após filtração, um extrato onde é feita a determinação do fósforo remanescente, sendo então a quantidade de fósforo adsorvida pelo solo determinada por diferença entre a quantidade de fósforo aplicada e a de fósforo remanescente após agitação. Os resultados dessa análise foram de 30,4 e 34,5% para as camadas de 0 a 15 cm e de 15 a 30 cm de profundidade, respectivamente. São considerados valores médios em termos de fixação de fósforo, representando de forma adequada grande parte dos solos brasileiros quanto à esta propriedade (LOPES, 1984; RAIJ, 1991).

Na tabela 3 encontram-se informações referentes à área experimental, as quais podem e foram introduzidas no programa.

Tabela 2 - Análises químicas e físicas de amostras de solo coletadas (setembro/2004) na Fazenda Santa Maria previamente ao experimento

L	PS	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	Sat B	m	A	S	Arg
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)						(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
				$\text{mg dm}^{-3}$		----- $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----							-----%-----				
R	1	4,7	45	5	7	1,3	20	14	2	52	35,3	87,3	40	5	21	4	75
R	2	4,4	36	3	7	0,8	10	6	4	58	16,8	74,8	22	19	20	2	78
R	3	4,5	33	1	3	1,4	9	4	3	42	14,4	56,4	26	17	18	4	78

(1) L=Local: Rondonópolis/MT; (2) PS=Profundidade do Solo: 1=0-15cm, 2=15-30cm, 3=30-45cm; (3) pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01M; (4) Matéria Orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ); (5) Fósforo: 0-6=muito baixo, 7-15=baixo, 16-40=médio, 41-80=alto, >80=muito alto; (6) Enxofre: 0-4=baixo, 5-10=médio, >10=alto; (7) Soma de Bases: K+Ca+Mg; (8) Capacidade de Troca de Cátions; (9) Saturação de Bases; (10) Saturação de Alumínio; (11) Areia; (12) Silte e (13) Argila.

Tabela 3 - Informações gerais relacionadas à área experimental

Ítem	Situação
Latitude	S = 17°10'16"
Longitude	W = 54°74'53"
Altitude	488 m
Topografia	Plana
Solo	Latossolo Vermelho Férrico
Época de cultivo de culturas de verão	Novembro a Abril
Detalhes gerais da área	Fazenda privada com campo experimental explorado pela Fundação Mato Grosso
Clima	Verão chuvoso e inverno seco
Rotação de cultura na região do experimento	Soja – Algodão e Soja – Milheto
Produtividades típicas de soja em anos adequados	3,5 a 4,0 t ha <sup>-1</sup>

O delineamento geral do experimento está apresentado na tabela 4. Foram usadas quatro repetições e as fontes de fósforo foram: superfosfato simples - SSP (fonte padrão de P solúvel em água), rocha fosfática de Araxá (fonte local de P) e rocha fosfática de Gafsa (fonte padrão de rocha fosfática), utilizadas em todos os experimentos. As fontes foram aplicadas a lanço e incorporadas em camadas de solo de 15 cm, em doses de 60, 120 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, baseado no teor total de P de cada fonte, além do tratamento testemunha para cada fonte de P. O superfosfato simples também foi aplicado na linha, na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, como tratamento adicional. As parcelas (unidades experimentais) tiveram nove linhas de soja, espaçadas de 0,45 m, por seis metros de comprimento.

Tabela 4 – Delineamento geral do experimento

<b>Tratamento</b>	<b>Fonte de P</b>	<b>Dose de P (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>)</b>
1	SSP <sup>(1)</sup>	0
2	SSP	60
3	SSP	120
4	SSP	240
5	Araxá	0
6	Araxá	60
7	Araxá	120
8	Araxá	240
9	Gafsa	0
10	Gafsa	60
11	Gafsa	120
12	Gafsa	240
13	SSP <sup>(2)</sup>	120

<sup>(1)</sup> SSP = superfosfato simples; <sup>(2)</sup> superfosfato simples aplicado na linha (tratamento extra ao modelo de predição).

Os resultados da determinação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> das fontes de P realizados no Departamento de Ciência do Solo/ESALQ-USP estão apresentados na tabela 5 e indicam, baseado na solubilidade em citrato neutro de amônio (CNA), baixa e elevada reatividade para as RFs de Araxá e Gafsa, respectivamente.

Tabela 5 - Resultados das análises químicas das fontes de fósforo

Fonte de P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)				
	Total	Solúvel em			
		CNA <sup>(1)</sup>		AC 2% <sup>(2)</sup>	Água
		1ª extração	2ª extração		
SSP	19,6	19,2	-	15,0	12,0
Araxá	24,4	1,8	1,6	4,7	0,7
Gafsa	28,9	7,1	7,8	10,7	0,3

<sup>(1)</sup> CNA – citrato neutro de amônio; <sup>(2)</sup> AC 2% - ácido cítrico a 2%

A soja (cultivar BRS 133) foi utilizada como planta teste. As operações de pré-plantio e manejo da cultura foram realizadas seguindo todas as condições para um bom desenvolvimento e produtividade e estão descritas no apêndice. Além do fósforo foi feita aplicação de outros nutrientes em doses adequadas para evitar limitação nutricional (100, 7, 15, 10 e 3 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O - KCl, B, Zn, Mn e Cu). Os micronutrientes foram aplicados por mistura de ácido bórico e os demais na forma de sulfato. O enxofre foi fornecido na forma de sulfato de cálcio (15% de S) em quantidade calculada para cada parcela no sentido de igualar a aplicação de enxofre das parcelas com a maior dose de SSP (240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). As sementes foram semeadas em novembro/2004 e a colheita foi realizada em Abril de 2005. A área útil da parcela foi de cinco linhas de soja por quatro metros de comprimento.

Após a colheita da soja, foram coletadas amostras de solo da camada de 0 a 15 cm de profundidade de todas as parcelas. Após secas e homogeneizadas, estas foram submetidas à análise de P pelo método da resina (RAIJ; QUAGGIO, 1983) no Departamento de Ciência do Solo/ESALQ-USP.

Os dados de produtividade de grãos de soja foram submetidos à análise estatística pelo programa SAS (SAS, 1985). As relações entre a produção de grãos de soja ou P-resina e a dose de P aplicada foram avaliadas utilizando os procedimentos de regressão múltipla do mesmo programa estatístico. Assim, dois tipos de análise estatística foram usados, um utilizando um fatorial completo de três fontes de P e quatro doses, e outro estabelecendo modelos para descrever a relação da dependente variável (produção de grãos de soja ou P-resina) como uma função de doses, mas fixando um intercepto comum, como a média de todos os resultados quando

não foi aplicado fósforo. Nesse caso, foi usada uma combinação de análise de regressão múltipla para todas as fontes de P (CHIEN; FRIESEN; HAMILTON, 1988).

O seguinte modelo reduzido foi testado:

$$Y_i = \beta_0 + (\beta_{1i} X_1)Z + (\beta_{2i} X_2)Z + (\beta_{3i} X_3)Z + \varepsilon_i$$

onde:  $Y_i$  é a produção de grãos de soja ou P-resina obtido com a fonte  $i$ ;  $\beta_0$  é o intercepto comum;  $\beta_{ni}$  representa o coeficiente angular da regressão para a fonte  $i$ , ou seja, em função de SSP ( $X_1$ ), RF de Araxá ( $X_2$ ) e RF de Gafsa ( $X_3$ );  $\varepsilon_i$  é o erro para o modelo ajustado; e  $Z$  é uma variável aleatória que assume o valor de 1 para a fonte considerada e 0 para as outras duas fontes.

Esse procedimento resultou em um intercepto comum das regressões com o eixo  $Y$  e um valor singular de MSE e  $R^2$  para as três equações de regressão testadas, sendo uma para cada fonte de fósforo. As funções de resposta testadas para descrever a relação entre os parâmetros estudados foram: linear, semi logarítmica e raiz quadrada, e optou-se por aquela que apresentava maior  $R^2$ . Chien, Sale e Friesen (1990) também utilizaram este procedimento estatístico, e discutem os princípios envolvidos neste tipo de regressão.

Os modelos testados estão apresentados a seguir:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i X + \varepsilon_i, X \geq 0, \quad [1]$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i \ln X + \varepsilon_i, X \geq 1 \text{ ou} \quad [2]$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_i X^{1/2} + \varepsilon_i, X \geq 0 \quad [3]$$

onde:  $Y_i$  é a produção de grãos de soja ou P-resina obtido com a fonte  $i$ ,  $X$  é a dose de P aplicada,  $\beta_i$  é o coeficiente angular da regressão para a fonte  $i$ ,  $\beta_0$  é o intercepto comum das regressões com o eixo  $Y$ , e  $\varepsilon_i$  é o erro para a regressão proposta.

A eficiência agronômica relativa (EAR) foi calculada para cada fonte de P e foi definida como a razão entre os dois coeficientes angulares:

$$EAR_i = \frac{\beta_i}{\beta_{SSP}} * 100 \quad [4]$$

onde:  $\beta_i$  é o coeficiente angular da regressão para a RF testada e  $\beta_{SSP}$  é o coeficiente angular da regressão para a fonte padrão de P, o SSP. A comparação dessas razões permite classificar as RFs em relação à fonte padrão de P em termos de eficiência potencial para produzir resposta (CHIEN; SALE; FRIESEN, 1990).

Para avaliar se houveram diferenças significativas entre duas fontes de P na amplitude das doses testadas, um valor F ( $= t^2$ ) foi calculado de acordo com a fórmula:

$$t = \frac{\beta_{ia} - \beta_{ib}}{\sqrt{[SE(\beta_{ia})]^2 + [SE(\beta_{ib})]^2}} \quad [5]$$

onde:  $\beta_{ia}$  é o coeficiente angular da regressão para a primeira fonte de P testada,  $\beta_{ib}$  é o coeficiente angular da regressão para a segunda fonte testada,  $SE(\beta_{ia})$  é o erro padrão para  $\beta_{ia}$  e  $SE(\beta_{ib})$  é o erro padrão para a fonte  $\beta_{ib}$ .

Os dados de EAR para as RFs em condições de campo, calculados pela fórmula [4], foram comparados aos valores de EAR obtidos pelo sistema PRDSS.

#### 4.2.2 Resultados e Discussão

Na tabela 6 estão apresentadas as médias para produção de grãos de soja e para os teores de P-resina. O conjunto completo dos dados está apresentado no apêndice.

Tabela 6 - Dados médios de produção de grãos de soja e teor de P-resina das amostras de solo coletadas após colheita da soja

Tratamento	Fonte de P	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Grãos de soja (kg ha <sup>-1</sup> )	P-resina (mg dm <sup>-3</sup> )
1	SSP <sup>(1)</sup>	0	1.012	4,0
2	SSP	60	1.464	5,3
3	SSP	120	1.516	5,8
4	SSP	240	1.808	9,5
5	Araxá	0	1.106	4,3
6	Araxá	60	1.317	5,5
7	Araxá	120	1.205	5,3
8	Araxá	240	1.398	6,3
9	Gafsa	0	864	4,0
10	Gafsa	60	1.464	10,0
11	Gafsa	120	1.676	9,8
12	Gafsa	240	1.623	20,6
13	SSP <sup>(2)</sup>	120	1.694	4,3

<sup>(1)</sup> SSP = superfosfato simples; <sup>(2)</sup> superfosfato simples aplicado na linha (tratamento extra ao modelo de predição).

A produção de grãos de soja foi relativamente baixa considerando produções obtidas em outros anos em Rondonópolis, sendo a razão principal para isso a ausência de chuvas no período de maturação dos grãos.

Verificou-se que muito embora o SSP aplicado de forma localizada ( $1.694 \text{ kg ha}^{-1}$ ) tenha sido numericamente maior que a mesma fonte aplicada a lanço ( $1.516 \text{ kg ha}^{-1}$ ), o teste por contraste ortogonal não foi significativo, ou seja, não houve diferença estatística para ambas variáveis quanto à forma de aplicação do SSP na dose de  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de P.

A análise de variância para o fatorial de três fontes de P e quatro doses indicou interação significativa entre as variáveis independentes. O efeito das doses e fontes de P na produção de grãos de soja pode ser observado na tabela 7 e figura 2.

Tabela 7 - Comparação de médias para produção de grãos de soja considerando três fontes de P e quatro doses de P aplicadas

Fonte de P	Dose de $\text{P}_2\text{O}_5$ ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			
	0	60	120	240
SSP	1.012 C a	1.464 B a	1.516 B a	1.808 A a
RF Araxá	1.106 B a	1.317 AB a	1.205 AB a	1.398 A b
RF Gafsa	864 B a	1.464 A a	1.676 A a	1.623 A ab

Valores seguidos pela mesma letra (letra maiúscula na linha comparando doses, letra minúscula na coluna comparando fontes de P) não são estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

Entre os modelos testados a função logarítmica foi a que melhor se ajustou aos dados de produção de grãos de soja em função das doses ( $R^2$  igual a 0,981, 0,980 e 0,969 para os modelos semi logarítmico, raiz quadrada e linear, respectivamente). A estatística e os modelos mostraram que  $\text{SSP} = \text{RF Gafsa} > \text{RF Araxá}$  em termos de produção de grãos de soja (Figura 2).

Tabela 8 – Estimativas de regressão para os modelos descrevendo a relação entre produção de grãos de soja ou P-resina nas amostras de solo e doses de  $P_2O_5$  aplicadas. Modelos em formato logarítmico e linear para produção de grãos e P-resina, respectivamente

Fonte de P	Estimativa	Produção de grãos de soja	P-resina
Intercepto	$\beta_0$	994	4,1
SSP	$\beta_1$	127,37* B <sup>(1)</sup> (12,15) <sup>(2)</sup>	0,0207* A <sup>(1)</sup> (0,0060) <sup>(2)</sup>
RF Araxá	$\beta_2$	65,18* B (12,15)	0,0098* B (0,0060)
RF Gafsa	$\beta_3$	123,89* A (12,15)	0,0657* A (0,0060)
N <sup>o</sup> de observações		52	52
$Sy^{\wedge}$ <sup>(3)</sup>		202,82	3,31

\* Significativo ao nível de 0,05; <sup>(1)</sup> valores seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ); <sup>(2)</sup> erros padrões das estimativas; <sup>(3)</sup> desvio padrão da resposta.

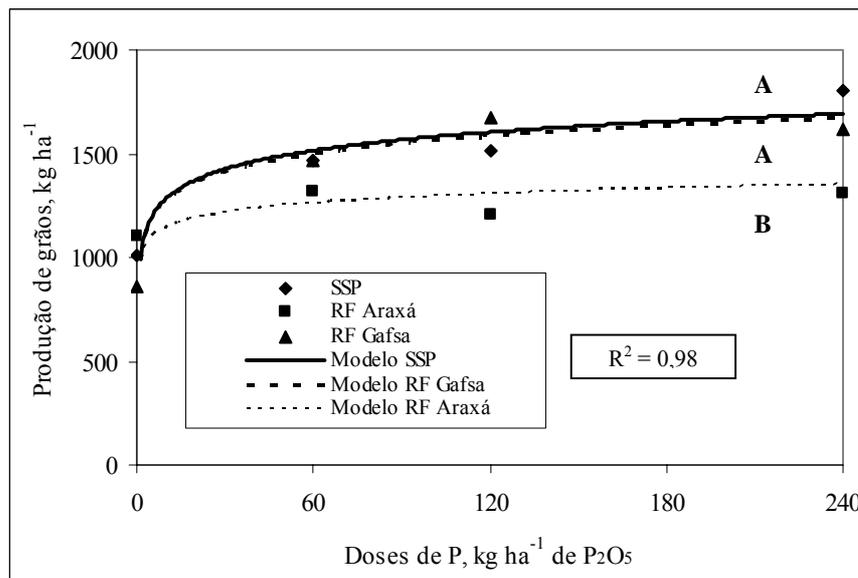


Figura 2 - Produção de grãos de soja em função de fontes e doses de fósforo. Modelos seguidos de mesma letra não são estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ )

Os resultados de P-resina (Tabela 9 e Figura 3) apontaram que o teor de P disponível medido por essa metodologia foi da ordem RF Gafsa > SSP = RF Araxá. O índice relativo nesse caso foi de 100%, 47% e 317%, para SSP, RF Araxá e RF Gafsa, respectivamente (Tabela 10).

Esses resultados sugerem uma melhor performance da RF Gafsa em termos de efeito residual, opostamente ao SSP e RF Araxá, o que deve estar relacionado à contínua liberação de P da reserva residual desta fonte.

O efeito intermediário do SSP, para P-resina, pode ser atribuído à elevada solubilidade em água dessa fonte, provendo uma quantidade relativamente grande de P à solução do solo, favorecendo a reação desse com componentes do solo, que levam à fixação do nutriente. Esse fato é reportado por diversos autores, dentre eles Mutuo et al. (1999).

Tabela 9 - Comparação de médias para P-resina das amostras de solo coletadas após colheita da soja, considerando três fontes de P e quatro doses de P aplicadas

Fonte de P	Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )			
	0	60	120	240
SSP	4,0 B a	5,3 AB b	5,8 AB ab	9,5 A b
RF Araxá	4,3 A a	5,5 A b	5,3 A b	6,3 A b
RF Gafsa	4,0 C a	10,0 B a	9,8 B a	20,6 A a

Valores seguidos pela mesma letra (letra maiúscula na linha comparando doses, letra minúscula na coluna comparando fontes de P) não são estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

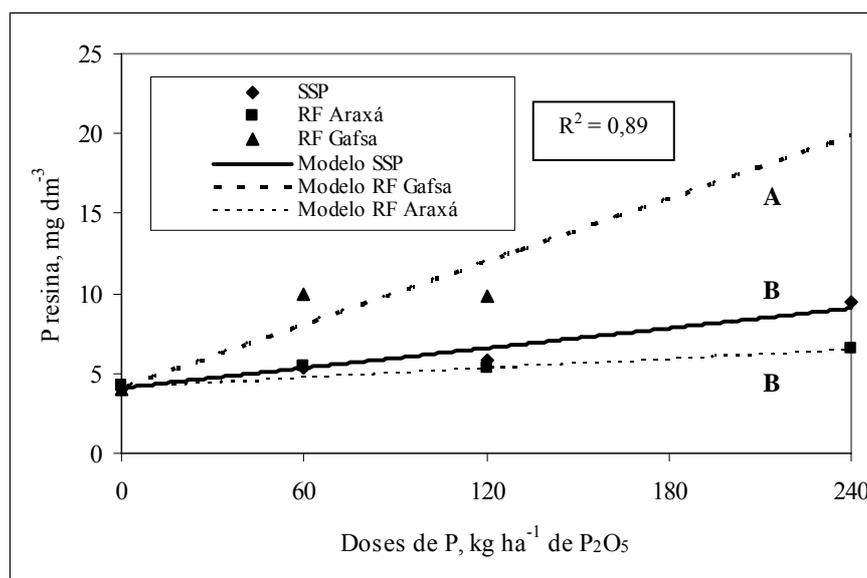


Figura 3 – Teor de P-resina em amostras de solo coletadas após colheita da soja em função da fonte de P e dose de P aplicadas. Modelos seguidos de mesma letra não são estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ )

Pode-se observar também que conforme as doses foram incrementadas, houve acréscimo ou tendência de acréscimo no P-resina, para todas as fontes (Tabela 9). Isso pode ser explicado pelo fato de que a adsorção diminui à medida que aumentam as adições de fósforo, conseqüentemente aumentando a disponibilidade (HEREDIA; CIRELLI, 2007).

Os resultados de eficiência agrônômica relativa foram de 100%, 51% e 97% para o SSP, RF de Araxá e RF de Gafsa, respectivamente (Tabela 10). Os números indicam que a RF Araxá foi 51% tão eficiente quanto o SSP em incrementar a produção de grãos de soja na média das doses testadas, enquanto a RF Gafsa foi 97%. Esses resultados foram baseados nas estimativas de regressão para os modelos ajustados, que estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 10 - Valores calculados de eficiência relativa das rochas fosfáticas de Araxá e Gafsa com relação ao superfosfato simples baseada na produção de grãos de soja e teor de P-resina em amostras de solo coletadas após colheita da soja

Fonte de P	Eficiência Agrônômica Relativa (%)	
	Produção de grãos	P-resina
SSP	100	100
RF Araxá	51	47
RF Gafsa	97	317

Os resultados de P-resina sugerem confirmação das informações providas por outros autores, de que certas rochas fosfáticas podem apresentar melhor eficiência agrônômica residual, quando comparadas às fontes de P de elevada solubilidade em água, em solos com elevado teor de argila e capacidade de fixação de fósforo (NUNES, 1984; CHIEN; HAMMOND, 1989; REDDY et al., 1999; GHOSAL et al., 2003; HEREDIA; CIRELLI, 2007).

As diferenças entre RF de Araxá e de Gafsa podem ser atribuídas as suas constituições, pois, enquanto Araxá é um fosfato apatítico com pequeno grau de substituição em sua estrutura cristalina e apresenta baixa eficiência para as culturas anuais, o fosfato de Gafsa apresenta alto grau de substituição do  $\text{PO}_4^{-3}$  pelo  $\text{CO}_3^{-2}$  sendo, portanto, mais facilmente solubilizado, além de apresentar solubilidade mediana em ácido cítrico (NAKAYAMA et al., 1998; SAVINI et al., 2006).

Foram comparados os valores previstos pelo PRDSS de eficiência agrônômica das rochas fosfáticas em relação ao superfosfato simples com os valores observados no campo. O PRDSS previu a EAR de 33% e 100% para as RFs de Araxá e Gafsa, respectivamente, enquanto os valores de EAR observados foram de 51% e 97% para as RFs de Araxá e Gafsa, respectivamente. Essa comparação permite inferir que os valores de EAR previstos e observados se ajustaram bem em condições brasileiras tanto para a RF Araxá como para a RF Gafsa.

### 4.3 Conclusão

Os valores de EAR previstos pelo PRDSS (33% para RF de Araxá e 100% para RF de Gafsa) e observados no campo (51% para RF de Araxá e 97% para RF de Gafsa) foram similares em condições brasileiras. Os resultados indicam que o modelo proposto (PRDSS) foi capaz de prever a EAR das fontes de P satisfatoriamente.

### Referências

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock as influenced by soil phosphorus-fixing capacity. **Plant and Soil**, The Hague, v. 120, p. 159-164, 1989.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 41, p. 227-234, 1995.

CHIEN, S.H.; FRIESEN, D.K.; HAMILTON, B.W. Effect of application method on availability of elemental sulfur in cropping sequences. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 165-169, 1988.

CHIEN, S.H.; SALE, P.W.G.; FRIESEN, D.K. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 24, p. 149-157, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FASSBENDER, H.; IGUE, Y. Comparación de métodos radiométricos y colorimétricos em estudios sobre retención y transformación de fosfatos en el suelo. **Turrialba**, San Jose, v. 17, p. 284-287, 1967.

GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 166, p. 750-755, 2003.

GILLARD, P.; SALE, P.N.G.; TENNAKOON, S.B. Building an expert system to advise on use of reactive phosphate rock on Australian pastures. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 37, n. 8, p. 1077-1084, 1997.

HART, M.R.; QUIN, B.F.; NGUYEN, M.L. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 33, p. 1954-1972, 2004.

HEREDIA, O.S.; CIRELLI, A.F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, n. 3-4, p. 426-431, 2007.

LEON, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 798-802, 1986.

LOPES, A.S. **Solos sob “cerrado”**. Piracicaba: Potafos, 1984. 162 p.

MUTUO, P.K.; SMITHSON, P.C.; UBRES, R.J.; OKALEBO, R.J. Comparison of phosphate rock and triple superphosphate on a phosphorus-deficient Kenyan soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 30, p. 1091-1103, 1999.

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, n. 2, p. 183-190, 1998.

NUÑES, R. **La roca fosfórica**. Cochabamba: Glirf, 1984. v. 2, 245 p.

NYE, P.H.; KIRK, G.J.D. The mechanism of rock phosphate solubilization in the rizosphere. **Plant and Soil**, The Hague, v. 100, p. 127-134, 1987.

RAIJ, B. van **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 31 p. (IAC. Boletim Técnico, 81).

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 284 p.

REDDY, D.D.; RAO, A.S.; REDDY, K.S.; TAKKAR, P.N. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on Vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 62, p. 181-190, 1999.

SAS INSTITUTE. **SAS for linear models**: a guide to the ANOVA and GLM procedures. 5<sup>th</sup> ed. Cary, 1985. 956 p.

SAVINI, I.; SMITHSON, P.C.; KARANJA, N.K.; YAMASAKI, H. Influence of *Tithonia diversifolia* and triple superphosphate on dissolution and effectiveness of phosphate rock in acidic soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, p. 593-604, 2006.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A.; PROCHNOW, L.I. Rainfall intensity and phosphorus source effects on phosphorus transport in surface runoff from soil trays. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 373, n. 1, p. 334-343, 2007.

SINGH, U.; WILKENS, P.W.; HENAO, J.; CHIEN, S.H.; HELLUNS, D.T.; HAMMOND, L.L. An expert system for estimating agronomic effectiveness of freshly applied phosphate rock. In: RAJAN, S.S.S.; CHIEN, S.H. (Ed.). **Direct application of phosphate rock and related technology – latest developments and practical experiences**. Kuala Lumpur: Malaysia, 2003. p. 214-224.

SMALLBERGER, S.A.; SINGH, U.; CHIEN, S.H.; HENAO, J.; WILKENS, P.W. Development and validation of a Phosphate Rock Decision Support System. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 471-483, 2006.

WATKINSON, J.H. Modeling the dissolution rate of reactive phosphate rock in New Zealand pastoral soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 32, p. 739-753, 1994.

## **APÊNDICES**

Apêndice A – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho em função de doses de fósforo (curva de resposta). Dados do experimento de curva de resposta

<b>Doses de P (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Repetições</b>	<b>MSPA (g)</b>	<b>Média</b>
0	A	2,4	1,9
	B	1,4	
	C	1,9	
12,5	A	2,5	2,6
	B	2,3	
	C	2,9	
25,0	A	3,4	2,8
	B	2,4	
	C	2,6	
50,0	A	6,1	7,0
	B	7,8	
	C	7,0	
100,0	A	19,7	17,2
	B	13,9	
	C	17,9	

Apêndice B – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho no experimento de rocha fosfática de Patos de Minas com turfa

Tratamentos	Identificações	MSPA (g)				Média
		Repetições				
		A	B	C	D	
testemunha	sem aplicação de P	2,0	1,9	1,8	2,3	2,0
FMC	fosfato monocálcico	15,9	16,1	19,3	15,1	16,6
PM	RF de PM sem processo <sup>(1)</sup>	2,2	3,1	2,7	2,1	2,5
PMPH	RF de PM com processo <sup>(2)</sup>	2,0	1,8	1,9	2,7	2,1
T	turfa sem processo	2,0	2,1	1,8	2,0	2,0
TPH	turfa com processo	2,2	2,1	2,0	2,0	2,1
PMPH + T	RF de PM com processo + turfa sem processo	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1
PM + TPH	RF de PM sem processo + turfa com processo	2,0	2,0	2,2	1,7	2,0
PMT	RF de PM sem processo + turfa sem processo	1,9	2,0	1,8	1,8	1,9
PMTPH	RF de PM e turfa passados juntos pelo processo <sup>(3)</sup>	4,2	3,6	3,6	4,2	3,9

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento.

Apêndice C – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de milho no experimento de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa

Tratamentos	Identificação	MSPA (g)			Média
		Repetições			
		A	B	C	
testemunha	sem aplicação de P	1,6	2,1	1,3	1,7
FMC	fosfato monocálcico	13,1	11,5	12,3	12,3
FMC + T	FMC sem processo + turfa sem processo	12,8	11,2	10,8	11,6
FMC + TPH	FMC sem processo + turfa com processo	13,6	13,0	11,9	12,8
A	RF de Arad sem processo <sup>(1)</sup>	5,4	4,9	5,7	5,3
APH	RF de Arad com processo <sup>(2)</sup>	6,1	5,7	5,7	5,8
A + T	RF de Arad sem processo + turfa sem processo	4,6	5,3	4,7	4,9
A + TPH	RF de Arad sem processo + turfa com processo	4,9	4,0	5,5	4,8
APH + T	RF de Arad com processo + turfa sem processo	6,8	7,2	5,7	6,6
APH + TPH	RF de Arad com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	8,0	5,9	5,5	6,5
ATPH	RF de Arad e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	4,8	7,4	7,0	6,3
T	turfa sem processo	0,9	1,6	1,4	1,3
TPH	turfa com processo	1,9	1,4	1,3	1,5
Tap	Tapira sem processo	1,4	1,3	1,2	1,3
TapPH	Tapira com processo	2,3	1,6	1,5	1,8
Tap + T	Tapira sem processo + turfa sem processo	1,2	1,5	1,7	1,5
Tap + TPH	Tapira sem processo + turfa com processo	1,4	1,5	1,4	1,4
TapPH + T	Tapira com processo + turfa sem processo	1,7	1,9	1,6	1,7
TapPH + TPH	Tapira com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	2,4	1,6	1,1	1,7
TapTPH	Tapira e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	2,1	1,7	1,4	1,7

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> mistura manual dos materiais; <sup>(4)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento.

Apêndice D – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de braquiária (1º corte) no experimento de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa

Tratamentos	Identificação	MSPA (g)			Média
		Repetições			
		A	B	C	
testemunha	sem aplicação de P	0,4	0,4	0,4	0,4
FMC	fosfato monocálcico	3,2*	26,0	20,1	23,0
FMC + T	FMC sem processo + turfa sem processo	6,5*	24,7	15,0	19,9
FMC + TPH	FMC sem processo + turfa com processo	23,9	16,8	4,9*	20,3
A	RF de Arad sem processo <sup>(1)</sup>	9,3	6,2	18,9	11,4
APH	RF de Arad com processo <sup>(2)</sup>	13,7	23,3	12,1	16,4
A + T	RF de Arad sem processo + turfa sem processo	11,7	10,9	5,0*	11,3
A + TPH	RF de Arad sem processo + turfa com processo	20,9	6,8*	16,7	18,8
APH + T	RF de Arad com processo + turfa sem processo	25,4	25,3	6,9*	25,4
APH + TPH	RF de Arad com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	27,8	18,7	16,9	21,1
ATPH	RF de Arad e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	12,3	19,7	23,9	18,6
T	turfa sem processo	0,3	0,3	0,3	0,3
TPH	turfa com processo	0,4	0,4	0,2	0,3
Tap	Tapira sem processo	0,4	0,2	0,4	0,3
TapPH	Tapira com processo	0,9	0,3	0,4	0,5
Tap + T	Tapira sem processo + turfa sem processo	0,5	0,6	0,4	0,5
Tap + TPH	Tapira sem processo + turfa com processo	0,6	0,4	0,3	0,4
TapPH + T	Tapira com processo + turfa sem processo	0,6	0,6	0,3	0,5
TapPH + TPH	Tapira com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	0,3	1,5	0,4	0,7
TapTPH	Tapira e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	0,5	0,4	1,0	0,6

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> mistura manual dos materiais; <sup>(4)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento; \* dados considerados outliers pelo SAS, portanto não participam da média.

Apêndice E – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de braquiária (2º corte) no experimento de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa

Tratamentos	Identificação	MSPA (g)			Média
		Repetições			
		A	B	C	
FMC	fosfato monocálcico	5,8*	14,1	18,8	16,5
FMC + T	FMC sem processo + turfa sem processo	16,5	16,7	18,6	17,3
FMC + TPH	FMC sem processo + turfa com processo	16,4	22,0	12,8	17,1
A	RF de Arad sem processo <sup>(1)</sup>	11,9	8,2	20,4	13,5
APH	RF de Arad com processo <sup>(2)</sup>	20,5	21,3	23,8	21,9
A + T	RF de Arad sem processo + turfa sem processo	17,2	21,5	6,0*	19,4
A + TPH	RF de Arad sem processo + turfa com processo	19,5	7,8*	19,5	19,5
APH + T	RF de Arad com processo + turfa sem processo	20,9	14,7	6,6*	17,8
APH + TPH	RF de Arad com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	13,7	19,4	21,1	18,0
ATPH	RF de Arad e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	14,6	21,1	20,7	18,8

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> mistura manual dos materiais; <sup>(4)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento; \* dados considerados outliers pelo SAS, portanto não participam da média.

Apêndice F – Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas de braquiária (3º corte) no experimento de rocha fosfática de Arad ou rejeito de Tapira com turfa

Tratamentos	Identificação	MSPA (g)			Média
		Repetições			
		A	B	C	
FMC	fosfato monocálcico	22,5	21,0	24,0	22,5
FMC + T	FMC sem processo + turfa sem processo	22,7	23,1	22,3	22,7
FMC + TPH	FMC sem processo + turfa com processo	21,8	26,3	22,0	23,3
A	RF de Arad sem processo <sup>(1)</sup>	24,1	29,7	23,1	25,6
APH	RF de Arad com processo <sup>(2)</sup>	27,8	26,2	25,3	26,4
A + T	RF de Arad sem processo + turfa sem processo	23,7	24,0	20,9	22,9
A + TPH	RF de Arad sem processo + turfa com processo	22,6	27,5	21,0	23,7
APH + T	RF de Arad com processo + turfa sem processo	24,0	23,3	18,7	22,0
APH + TPH	RF de Arad com processo + turfa com processo <sup>(3)</sup>	17,2	25,5	23,6	22,1
ATPH	RF de Arad e turfa passados juntos pelo processo <sup>(4)</sup>	21,7	28,7	27,5	25,9

<sup>(1)</sup> sem exposição ao equipamento Humifert; <sup>(2)</sup> com exposição ao equipamento Humifert; <sup>(3)</sup> mistura manual dos materiais; <sup>(4)</sup> composto de interesse – mistura de material fosfático e orgânico submetidos ao equipamento.

Apêndice G – Manejo para bom desenvolvimento e produtividade da cultura da soja no experimento do PRDSS

---

Culturas de inverno	Milheto para cobertura de solo
Sistemas de plantio	Plantio direto após milheto
Cultivar	BRS 133 (20 sementes por metro linear)
Inseticida	Standak 100 mL / 50 kg de sementes
Fungicida	Cofermol Plus 90 mL / 50 kg de sementes (Mo: 12%; Co:1,3%; d = 1,45 g cm <sup>-3</sup> )
Inoculante	Nitragin Cell Tech 150 mL / 50 kg de sementes
Herbicida	Para plantas daninhas de folha larga e estreita (Basagran + Fusilade)
Inseticida lagarta	1 <sup>a</sup> aplicação: Thiodan 300 mL ha <sup>-1</sup> e 2 <sup>a</sup> aplicação: Dimilin 50 g ha <sup>-1</sup>
Inseticida percevejo	1 <sup>a</sup> aplicação: Tamarron 300 mL ha <sup>-1</sup> + sal e 2 <sup>a</sup> aplicação: Azodrin 500 mL ha <sup>-1</sup>
Fungicida foliar	1 <sup>a</sup> aplicação: Derosal 500 mL ha <sup>-1</sup> e 2 <sup>a</sup> aplicação: Opera 500 mL ha <sup>-1</sup>

---

Apêndice H - Produção de grãos de soja em função de doses e fontes de  $P_2O_5$  aplicadas (experimento PRDSS)

Tratamento	Fonte de P	Doses de $P_2O_5$ (kg ha <sup>-1</sup> )	Repetições				Média
			A	B	C	D	
1	SSP <sup>(1)</sup>	0	894	985	1.033	1.136	1.012
2	SSP	60	1.496	1.359	1.232	1.767	1.464
3	SSP	120	1.537	1.563	1.447	1.515	1.516
4	SSP	240	1.786	2.134	1.330	1.982	1.808
5	Araxá	0	1.048	1.132	1.242	1.003	1.106
6	Araxá	60	1.320	1.095	1.450	1.403	1.317
7	Araxá	120	1.271	1.329	1.010	1.210	1.205
8	Araxá	240	1.505	1.389	1.351	1.345	1.398
9	Gafsa	0	569	1.132	882	874	864
10	Gafsa	60	1.554	1.144	1.689	1.469	1.464
11	Gafsa	120	2.008	1.560	1.757	1.380	1.676
12	Gafsa	240	1.870	1.703	1.234	1.685	1.623
13	SSP <sup>(2)</sup>	120	1.721	1.624	1.909	1.521	1.694

<sup>(1)</sup> SSP = superfosfato simples; <sup>(2)</sup> superfosfato simples aplicado na linha (tratamento extra ao modelo de predição).

Apêndice I – Teores de P-resina das amostras de solo coletadas em cada parcela após colheita da soja em função de doses e fontes de  $P_2O_5$  aplicadas (experimento PRDSS)

Tratamento	Fonte de P	Doses de $P_2O_5$ (kg ha <sup>-1</sup> )	Repetições				Média
			A	B	C	D	
1	SSP <sup>(1)</sup>	0	4	4	4	4	4,0
2	SSP	60	4	5	5	7	5,3
3	SSP	120	5	5	8	5	5,8
4	SSP	240	8	6	11	13	9,5
5	Araxá	0	4	4	4	5	4,3
6	Araxá	60	5	5	6	6	5,5
7	Araxá	120	6	5	6	4	5,3
8	Araxá	240	7	5	7	7	6,3
9	Gafsa	0	3	5	4	4	4,0
10	Gafsa	60	17	6	5	12	10,0
11	Gafsa	120	13	10	7	9	9,8
12	Gafsa	240	29	10	25	19	20,6
13	SSP <sup>(2)</sup>	120	4	4	5	4	4,3

<sup>(1)</sup> SSP = superfosfato simples; <sup>(2)</sup> superfosfato simples aplicado na linha (tratamento extra ao modelo de predição).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)