

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REJEITOS DA INDÚSTRIA DE
FERTILIZANTES FOSFATADOS**

LUCIANA DE ARRUDA GARCIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU - SP

Dezembro - 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REJEITOS DA INDÚSTRIA DE
FERTILIZANTES FOSFATADOS**

LUCIANA DE ARRUDA GARCIA

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU – SP

Dezembro – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G216e Garcia, Luciana de Arruda, 1983-
Eficiência agronômica de rejeitos da indústria de fertilizantes fosfatados / Luciana de Arruda Garcia. - Botucatu: [s.n.], 2014
x, 78 f. : fots. color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Leonardo Theodoro Büll
Inclui bibliografia

1. Fertilizantes fosfatados. 2. Fertilizantes - Resíduos. 3. Adubação. 4. Calagem. I. Büll, Leonardo Theodoro. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE REJEITOS DA INDÚSTRIA DE
FERTILIZANTES FOSFATADOS”

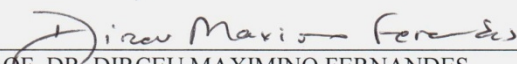
ALUNA: LUCIANA DE ARRUDA GARCIA

ORIENTADOR: PROF. DR. LEONARDO THEODORO BÜLL

APROVADO PELA COMISSÃO EXAMINADORA:



PROF. DR. LEONARDO THEODORO BÜLL



PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES



PROF. DR. RENATO DE MELLO PRADO

Data da Realização: 27 de outubro de 2014.

*Para as mulheres da minha vida,
Minha mãe, **Maria Josefina** e minha irmã **Daniela**,
que me ensinaram o verdadeiro sentido de lutar por aquilo que acreditamos.*

DEDICO

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo permanece a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante”.

Charlie Chaplin

AGRADECIMENTOS

- *Primeiramente agradeço a Deus por estar viva, aprendendo com seus ensinamentos e concretizando este objetivo.*
- *Á minha família, em especial a minha querida mãe, meu maior exemplo, que me ensinou o verdadeiro sentido de se lutar por um objetivo e nunca desistir, e para minha irmã, minha companheira de todas as horas que sempre me apoia e me incentiva. Obrigada por existirem na minha vida!*
- *Á Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA UNESP/BOTUCATU-SP, ambiente no qual vivi os melhores anos da minha vida.*
- *Ao professor Dr. Pedro de Magalhães Padilha pela orientação e apoio na iniciação científica, sem sua ajuda seria impossível à realização deste trabalho.*
- *Aos professores Dr. Leonardo Theodoro Büll pela orientação deste trabalho e orientação de vida; ao professor Dr. Dirceu Maximino Fernandes pelo auxílio na minha caminhada acadêmica e pela orientação de vida, muitas vezes acreditando mais em mim do que eu mesma.*
- *Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de estudos.*
- *A todos os funcionários do Departamento de Solos e Recursos Ambientais que estiveram ligados direta e indiretamente no auxílio desde trabalho, em especial, aos funcionários Sr. Jair Vieira e Sr. Pedro Alves (Pedrinho), seria impossível sem a sua ajuda de vocês!*
- *Aos meus amigos de Pós-graduação, a quem agradeço por toda ajuda prestada, em especial, à Aline da Silva Sandim e Natália Rodrigues Ferreira que foram minhas companheiras em todos os momentos; aos amigos Ana Guirra, Amaralina Celoto Guerreiro, Bruna Soldera, Claudiane Paes, Débora Latorre, Diego Belapart, Fernanda de Souza Antonio, Gustavo Becari, Graziela Spada, Jader Nantes, José Carlos de Deus Júnior, Jesaelen Gizotti de Moraes, Kézia Carolina, Marcos Liodorio, Patrícia Mariano, Thaís Alves e Vanessa Polinio e aos demais que me auxiliaram nesta caminhada.*
- *A todos que de alguma forma contribuía para tornar concreto esse trabalho.*

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA	6
4.1 A importância da adubação fosfatada no Cerrado	7
4.2 Disponibilidade de fósforo em função das condições de reação no solo.....	9
4.3 Fontes fosfatadas alternativas	15
4.4 Eficiência agrônômica de fosfatos	20
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1 Localização e Caracterização dos experimentos.....	26
5.2 Caracterização do solo	27
5.3 Caracterizações das fontes de fósforo	28
5.4 Experimento 1 – Milho na ausência de calcário no solo.....	29
5.5 Experimento 2 – Milho na presença de calcário no solo	30
5.6 Delineamento Experimental.....	31
5.7 Avaliações	32
5.7.1 Avaliações na planta.....	32
5.7.1.1 Altura e diâmetro do colmo.....	32
5.7.1.2 Massa de Matéria Seca da Parte Aérea (MSPA).....	32
5.7.1.3 Teores de Nutrientes e Acúmulo de Fósforo.....	32
5.7.1.4 Índice de Eficiência Agrônômica.....	33
5.7.2 Avaliações no solo.....	33
5.7.2.1 Determinações químicas.....	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1 Atributos químicos do solo	34
6.1.1 Acidez do solo, fósforo solúvel e bases trocáveis	34
6.1.2 Teores de cálcio (Ca).....	40

6.2 Atributos das plantas de milho.....	41
6.2.1 Massa de Matéria Seca da Parte Aérea (MSPA).....	41
6.2.2 Teor e Acúmulo de fósforo na parte aérea da planta.....	44
6.2.3 Altura e Diâmetro de plantas de milho.....	52
6.3 Índices de Eficiência Agronômica	54
7. CONCLUSÕES	59
8. REFERÊNCIAS	60

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Características químicas das amostras de solo utilizadas nos experimentos.....	28
Tabela 2. Teores de P ₂ O ₅ total, solúvel em ácido cítrico a 2%, solúvel em CNA + H ₂ O e solúvel em H ₂ O das fontes utilizadas nos experimentos.	29
Tabela 3. Teores de nutrientes das fontes de fósforo testadas.....	29
Tabela 4. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas.	29
Tabela 5. Valores pH do solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e de ausência de calcário.	35
Tabela 6. Teor de fósforo no solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.	36
Tabela 7. Saturação por bases (V%) do solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.....	39
Tabela 8. Teor de cálcio no solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.	41
Tabela 9. Massa de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.	42
Tabela 10. Teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.	46
Tabela 11. Acúmulo de fósforo da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.	49
Tabela 12. Altura de plantas de milho nas condições de aplicação das fontes de fósforo, na presença e ausência de calcário.	53
Tabela 13. Diâmetro do colmo de plantas de milho nas condições de aplicação das fontes de fósforo, na presença e ausência de calcário.	53

Tabela 14. Índices de Eficiência Agronômica (IEA) das fontes de fósforo, com base na produção de matéria seca e fósforo acumulado da parte aérea de plantas de milho, nas condições de presença e ausência de calcário.	55
--	----

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação gráfica das temperaturas máximas e mínimas do município de Botucatu-SP, nos meses do ano de 2013.	27
Figura 2. Fotos dos experimentos 1 e 2 aos 52 dias após a semeadura da cultura do milho	31
Figura 3. Efeito das doses de fósforo no teor de fósforo resina, (a) presença de calcário no solo e (b) ausência de calcário.	37
Figura 4. Efeito das fontes e doses de fósforo na produção de matéria seca de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário.	44
Figura 5. Teor de fósforo na parte aérea de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário no solo, nas doses de fósforo aplicadas.	45
Figura 6. Fósforo acumulado na parte aérea de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário.	48
Figura 7. Correlação entre fósforo acumulado e teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho na presença de calcário, para as fontes (a) SFT, (b) FP1, (c) FP2 e (d) FR.	50
Figura 8. Correlação entre fósforo acumulado e teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho na presença de calcário, para as fontes (a) SFT, (b) FP1, (c) FP2 e (d) FR.	51
Figura 9. Índice de Eficiência Agronômica em relação à matéria seca da parte aérea de plantas de milho, (a) na presença de calcário no solo e (b) na ausência de calcário no solo.	57
Figura 10. Índice de Eficiência Agronômica em relação ao P acumulado da parte aérea de plantas de milho, (a) na presença de calcário no solo e (b) na ausência de calcário no solo.	58

1. RESUMO

A produção de fertilizantes fosfatados solúveis gera muitos rejeitos, cujo aproveitamento não é possível pelos atuais métodos industriais, acarretando perdas elevadas de P no beneficiamento, através da subutilização dos depósitos de fosfato, representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, devido aos grandes volumes envolvidos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência agrônômica de dois rejeitos da indústria de fertilizantes fosfatados como fonte de fósforo, em duas condições distintas de acidez do solo, utilizando-se milho como planta teste. O presente estudo constou de dois experimentos em condições distintas de acidez do solo, ambos realizados em casa de vegetação, com delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 4 x 4, com quatro repetições, totalizando 64 parcelas experimentais para cada experimento, nos quais utilizaram-se amostras de um Latossolo Vermelho distrófico. Os tratamentos foram compostos de quatro fontes de fósforo, dois rejeitos da indústria de fosfatos denominados: fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (FP2), um fosfato reativo (FR) e o superfosfato triplo (SFT), em quatro doses (0, 40, 80 e 120 mg dm⁻³ P). O experimento 1 constou da aplicação dos fosfatos no solo mantendo-se as condições iniciais da acidez do solo. O experimento 2 constou da aplicação dos tratamentos fosfatados no solo com aplicação de corretivo de acidez, cuja quantidade foi calculada para atingir 70% da saturação por bases. Amostras de terra foram coletadas para fins de análise química, em cada unidade experimental, antes da semeadura. Após sessenta dias realizou-se a colheita das plantas. Foram avaliados: altura de plantas, diâmetro do colmo, massa de matéria seca, teores de nutrientes e acúmulo de fósforo na

parte área e calculado o índice de eficiência agronômica em relação à massa de matéria seca e fósforo acumulado na parte aérea. As fontes FP1, FP2 e FR apresentaram maior eficiência agronômica na ausência de calcário no solo. Dentre os rejeitos testados, o FP1 apresentou os maiores índices de eficiência agronômica. Os rejeitos FP1 e FP2 podem ser utilizados como fontes alternativas de fósforo em solos ácidos.

Palavras-chave: Fertilizantes fosfatados alternativos, eficiência agronômica de fosfato.

AGRONOMIC EFFICIENCY OF WASTE INDUSTRY OF PHOSPHATE FERTILIZERS. Botucatu, 2014. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LUCIANA DE ARRUDA GARCIA

Adviser: LEONARDO THEODORO BÜLL

2. SUMMARY

The production of soluble phosphate fertilizers generates many tailings, whose the use is not possible by current industrial methods, resulting in high losses of P in beneficiation, through the solubilization of phosphate deposits, representing therefore a mineral not well used and a worrying environmental problem owing to the large volumes involved. In this context, the objective of this study was to assess the efficacy of two tailings from phosphate fertilizer industry as a source of phosphorus in two different conditions of soil acidity, using corn as test plant. The present study consisted of two experiments in different conditions of soil acidity, both were conducted in a greenhouse, with randomized blocks in 4 x 4 factorial designs with four replications, totaling 64 plots for each experiment in which they used samples of an Oxisol. The treatments were four sources of phosphorus, two tailings from the industrial production of phosphate called: phosphate precipitate 1 (FP1) and precipitated phosphate 2 (FP2), a reactive phosphate (FR) and triple superphosphate (TSP), in four doses (0, 40, 80 and 120 mg dm⁻³ P₂O₅). The first experiment consisted of applying phosphates in soil keeping the initial conditions of soil acidity. Experiment 2 consisted in the application of phosphate treatments on soil with corrective acidity application, whose amount was calculated to achieve 70% of saturation. Soil samples were collected for chemical analysis in each experimental unit, before sowing. The harvest of plants occurred sixty days later sowing and evaluated: plant height, stem diameter, dry matter, nutrient content and accumulation of phosphorus in the area and calculated the relative agronomic efficiency on the mass of dry matter and phosphorus accumulated in the shoot. The sources and levels of phosphorus influenced the relative agronomic efficiency in both systems studied soil acidity. The FP1 tailing obtained the best agronomic efficiencies in the dry matter and phosphorus accumulated in the two conditions of soil acidity studied. The RF power had

higher levels of agronomic efficiency of 95 and 73% dry matter P and driven, respectively, in the absence of lime in the soil.

Key-words: Alternative Phosphate fertilizers, agronomic efficiency of phosphate.

3. INTRODUÇÃO

A produção de fertilizantes fosfatados trata-se de cadeia produtiva com grande geração de resíduos sólidos. Em média, para se atingir a etapa de beneficiamento da rocha fosfática, sabe-se que em termos de proporção 1,6 milhões de m³/ano de produção geram 9 milhões de m³ de rejeitos, minérios marginais e estéreis de sensível deposição, que, estocados em pilhas, ocupam, em volume, grande parte das áreas das minas. Associados ao beneficiamento mineral, o grande volume de rejeitos está na raiz dos principais impactos ambientais, que se desdobram em questões relacionadas ao uso da terra e ao uso da água, já que as barragens de rejeitos e seus reservatórios ocupam terras agricultáveis ou áreas de conservação, além da apropriação de trechos do próprio corpo d'água, convertidos em componente do empreendimento (DIAS; LAJOLO 2009).

Sendo assim, torna-se necessária a implantação de um sistema eficiente para a gestão destes resíduos, de forma a controlar as etapas envolvidas desde a geração até sua disposição final. Este sistema, além de evitar danos ao meio ambiente permite também a implementação de uma política de reutilização e reciclagem de resíduos, reduzindo o volume a ser disposto em aterros.

Para contornar o problema da geração de resíduos, vem sendo proposto, nos últimos anos, o uso de fontes alternativas de fósforo na agricultura. Dentre os fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura brasileira, os superfosfatos e os fosfatos monoamônico e diamônicos se destacam. Estes fertilizantes apresentam elevada solubilidade no solo e correspondem a 95% do fósforo utilizado no país, possuindo elevada eficiência em qualquer condição de solo e cultura (SOUSA et al.,2010). Já os

fosfatos de baixa reatividade, ao disponibilizarem mais lentamente o P, fazem com que ocorra redução nos processos de fixação e podem favorecer melhor o aproveitamento pela planta, com prolongado efeito residual. Desta forma, o uso de fosfatos reativos tem sido boa alternativa para aumentar a eficiência e reduzir custos da adubação fosfatada, já que esses fertilizantes apresentam menores valores por unidade de fósforo.

As fontes de P mais solúveis possuem maior eficiência agronômica em curto prazo e apresentam maior tendência a retenção no solo à medida que aumenta o tempo de contato do fertilizante no solo. Efeito contrário pode ser observado em fontes de menor solubilidade.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência agronômica de dois rejeitos da indústria de fertilizantes fosfatados como fonte de fósforo, em duas condições distintas de acidez do solo, utilizando-se milho como planta teste.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 A importância da adubação fosfatada no Cerrado

O avanço do agronegócio brasileiro tem sido um fato notável na evolução econômica brasileira nas últimas três décadas (LOPES; DAHER, 2008). Um fator chave que regula este processo agrícola tem sido o uso adequado de técnicas de manejo de nutrientes garantindo a alta produtividade brasileira. Resende et al. (2004) relatam que a produção em larga escala de milho e outros grãos no Cerrado somente tornou-se viável com o desenvolvimento de tecnologias de melhoria da fertilidade dos solos da região.

Lopes et al. (2012) afirmam que um dos fatores chaves responsáveis pelo aumento da produção agrícola e a produtividade na região do Cerrado tem sido o aumento na eficiência do uso de fertilizantes, especialmente o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Em 1970/1971, no início da expansão agrícola do Cerrado brasileiro, o consumo médio de N, P_2O_5 e K_2O no Brasil era de apenas 7,7; 11,5 e 8,5 kg/ha, respectivamente. Por outro lado, em 2010/2011, o consumo médio de N, P_2O_5 e K_2O foram estimados em 39,9; 52,4 e 49,2 kg/ha, respectivamente, representando um aumento de 5,2; 4,6 e 5,8 vezes o consumo quando comparado com 1970/1971.

Dentre os vários nutrientes que as plantas precisam para produzir, o fósforo ocupa lugar de destaque, devido à sua deficiência generalizada na maioria dos solos brasileiros, que de maneira geral, em função do alto grau de intemperismo a que foram submetidos ao longo de sua formação, apresentam baixa fertilidade natural por conta

da elevada acidez, baixa saturação por bases, toxicidade de alguns elementos químicos e baixa disponibilidade de nutrientes (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A baixa fertilidade dos solos brasileiros, foi diagnosticada pelos trabalhos pioneiros de Fagundes et al. (1953) em solos do Cerrado. As curvas de resposta obtidas com culturas anuais na ausência de fósforo mostram rendimentos muito baixos, inviabilizando a agricultura na região sem adubação fosfatada (GOEDERT; LOBATO, 1983).

Limitações na disponibilidade de fósforo no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. O suprimento adequado de P é diferente dos demais nutrientes, essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT et al., 2001). 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 (SANCHES, 2002; BEDIN et al., 2003).

Dentre os nutrientes presentes nos fertilizantes, talvez o fósforo se constitua um dos mais limitantes para a cultura do milho, especialmente em solos sob vegetação de Cerrado (LOPES, 1984). Em sistemas de produção em que se emprega grande capital e alta tecnologia, de acordo com Coelho e Alves (2003), os gastos com correção do solo e adubação representam, em média, 40% a 45% do custo de produção da cultura do milho. Portanto, há necessidade de se estimar corretamente a quantidade de fertilizante que se deve ser aplicada no solo, com o intuito de satisfazer as necessidades da cultura (BAESSO et al., 2007). O uso racional de corretivos e fertilizantes é uma premissa necessária para o sucesso na produção (HEINRICHS et al., 2008).

Dentre os cereais cultivados no Brasil, o milho é o mais expressivo, com cerca de 54,37 milhões de toneladas de grãos produzidos, em uma área de aproximadamente 12,93 milhões de hectares (CONAB, 2010). No entanto, o que se observa na prática são produtividades muito baixas e irregulares, uma vez que a média da produtividade brasileira varia em torno de 3,5 t ha⁻¹ de grãos (BASTOS et al., 2010).

Embora as exigências do milho em fósforo sejam em quantidades bem menores que as em nitrogênio e as em potássio, as doses normalmente recomendadas são altas, em função da baixa eficiência (20 a 30%) de aproveitamento desse nutriente pela cultura (FANCELLI, DOURADO- NETO, 2000). 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, época de aplicação e localização do adubo.

Prado et al. (2001) como o objetivo de estudar os efeitos de doses de fertilizantes fosfatados em adubação de manutenção, 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 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Verificou-se que o uso de doses crescentes de P aumentou a produção de grão de milho, onde a maior dose de P proporcionou a maior produção de grãos, 7,25 t ha⁻¹, com aumento de 4,21 t ha⁻¹ de grãos em relação à testemunha.

Ao testar diferentes fontes de P no estabelecimento de pastagens de P. maximum consorciadas com sorgo, Benício et al. (2011), verificaram que ao final do primeiro ano de implantação os tratamentos que receberam a fonte menos solúvel foram superiores, os autores atribuíram os resultados ao maior efeito residual da fonte.

Em trabalho realizado por Silverol e Machado Filho (2007) estudando a utilização de pó de granito para a fertilização de solos, observaram que os tratamentos que continham quantidades significativas de pó de rocha, as plantas de milho desenvolveram adequadamente em comparação com a testemunha. Embora esse resultado seja inferior ao tratamento químico, altamente solúvel, evidencia a importância de fontes menos solúveis, em longo prazo, na melhoria da fertilidade de solos.

O requerimento de grandes quantidades de fosfato na correção da fertilidade dos solos sob vegetação de Cerrado e a ausência de reservas abundantes de rochas fosfatadas de boa qualidade no país, associados ao elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para otimizar a eficiência no uso de adubos fosfatados (RESENDE et al., 2004). Neste sentido, a ciência do solo vem estudando diferentes maneiras de melhorar a eficiência da adubação fosfatada e novas tecnologias de produção de fertilizantes vêm se destacando no cenário agrícola.

4.2 Disponibilidade de fósforo em função das condições de reação no solo

A baixa concentração natural de P nos solos agricultáveis é um dos principais limitantes para atingir o potencial produtivo das culturas (HINSINGER, 2001). Além disso, quando adicionado ao solo via fertilizantes, o fósforo sofre uma série de

processos e reações com os colóides do solo que invariavelmente levam à diminuição de sua disponibilidade as plantas.

O fósforo do solo é distribuído em formas que variam com a natureza química do ligante e a energia de ligação entre o solo e este elemento. Quanto à natureza do ligante, o P pode ser encontrado como P orgânico diéster, P orgânico monoéster, P inorgânico em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos, entre outras. Quanto à energia de ligação, o P pode estar associado a outros íons ou moléculas em ligações monodentadas, bidentadas e bionucleadas (DALAL, 1977; PARFITT, 1978). Assim, as formas de P do solo têm diferentes capacidades de dessorção e abastecimento da solução do solo, segundo sua natureza química e energia de ligação. Com o envelhecimento do solo, as formas lábeis de P diminuem e as formas não-lábeis aumentam, especialmente aquelas inorgânicas. A participação do P orgânico aumenta, e os processos biológicos tendem a governar sua disponibilidade para as plantas (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

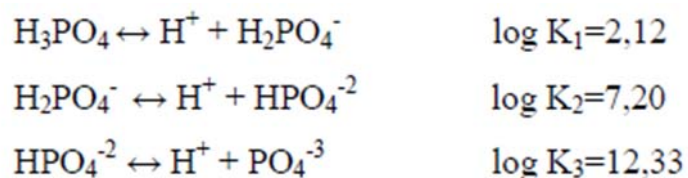
A baixa reversibilidade da adsorção desse elemento ao solo diminui a eficiência no seu aproveitamento pelas plantas (NOVAIS; SMYTH, 1999). Isso justifica o fato de se aplicar elevadas quantidades de fertilizantes, para satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do elemento (FURTINI NETO et al., 2001).

Em virtude da baixa concentração de P na solução, a quantidade prontamente disponível de P para as plantas é muito baixa, havendo a necessidade de solubilização de P da fase sólida para a solução para suprir as necessidades das culturas. Essa disponibilização depende do pH, do teor de óxidos e de outros fatores que alteram a equilíbrio P-sólido/P-solução (ANGHINONI; BISSANI, 2004). Então, a quantidade de P total nos solos tem pouca ou nenhuma relação com a disponibilidade às plantas (HAVLIN et al., 2005).

O principal processo que leva à baixa eficiência da adubação fosfatada é a transformação do P lábil para P não lábil (“fixação do P”), que por sua vez é o resultado dos processos de adsorção específica e da formação de compostos de baixa solubilidade, em especial, P-Fe e P-Al (LARSEN, 1967). Este é um típico cenário nas regiões dos trópicos úmidos, principalmente nos solos sob cerrado, pelo elevado poder de adsorção específica devido à predominância de oxihidróxidos de Fe e Al, os quais com a

caulinita perfazem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, sendo mais ativa e na qual ocorrem as reações (ARAI; SPARKS, 2007).

As formas de P na solução do solo dependem diretamente da acidez da mesma, conforme as reações de dissociação do H_3PO_4 (LINDSAY, 1979; RAIJ, 1991).



Segundo Prochnow et al (2004), de forma geral, a disponibilidade de P é maior em solos com pH na faixa de 5,5 a 7,0. O pH do solo controla a disponibilidade para as plantas das formas iônicas do fosfato. O ânion monovalente H_2PO_4^- tem sua disponibilidade aumentada em valores e pH abaixo de 7 enquanto ânion divalente HPO_4^{2-} tem sua disponibilidade aumentada em valores de pH maior que 7 (DECHEN; NACHTIGALL, 2007).

Dentre os atributos do solo o pH, índice que indica o grau de acidez ativa do solo, talvez seja, isoladamente, o mais relevante, no que se refere a utilização de fertilizantes. De maneira especial, a disponibilidade de nutrientes contidos no solo, ou a ele adicionado por meio das adubações, é bastante variável em função do pH do solo (MALAVOLTA et al., 1997). Cerca de 80% dos fertilizantes fosfatados adicionados ao solo são consumidos pela fixação de P em constituintes mineralógicos, sobretudo óxidos de ferro e de alumínio dos solos ácidos intemperizados das regiões tropicais (HEDLEY et al., 1990). Portanto o processo de fixação de P tem grande relevância no manejo da fertilidade do solo, visando maior eficiência de uso de fertilizantes fosfatados.

Dentre os fatores que afetam a adsorção de fósforo, o pH é aquele que pode ser alterado com o manejo químico, podendo constituir uma prática vantajosa pela redução das doses de fertilizantes fosfatados. A calagem, por exemplo, pode reduzir a adsorção de fósforo na maioria dos solos, tornando, cada vez mais negativa a carga do plano de adsorção e elevando a repulsão por fosfato. Assim, ocorre redução da adsorção e aumento da disponibilidade de P nativo do solo proveniente dos fertilizantes fosfatados solúveis com o uso de calcário (HAYNES, 1984).

As fontes de P mais solúveis possuem maior eficiência agronômica em curto prazo, mas apresentam maior tendência a perdas por retenção no solo à medida que aumenta o tempo de contato do fertilizante no solo (BHATTI; YAWAR, 2010). Estes fosfatos solúveis em água, quando adicionados ao solo dissolvem-se, passando rapidamente para a solução do solo. Devido à baixa solubilidade dos compostos de P formados no solo e as 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). Efeito contrário pode ser observado em fontes de menor solubilidade (PRADO et al., 2011). Já os insolúveis, como é o caso dos fosfatos naturais, se dissolvem lentamente na solução do solo e tendem a aumentar a disponibilidade do nutriente para as plantas ao longo do tempo (NOVAIS et al., 2007).

Os fertilizantes que possuem maior solubilidade compreendem os superfosfatos simples e triplo, fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP). Já os fosfatos de baixa reatividade, ao disponibilizarem mais lentamente o P, fazem com que ocorra uma redução nos processos de fixação e podem favorecer um melhor aproveitamento do nutriente pela planta, com prolongado efeito residual (XIONG et al., 2002; PROCHNOW; FRANCISCO; BRAGA, 2006). Desta forma, o uso de fosfatos reativos têm sido uma boa alternativa para aumentar a eficiência de uso do P e reduzir custos, já que esses fertilizantes apresentam menores valores por unidade de P (FREIRE et al., 2005).

Particularmente, para os fosfatos naturais, insolúveis em água, é necessário o suprimento de acidez para que alguma dissolução se inicie. Portanto, o suprimento de prótons (H^+) torna-se particularmente importante para a dissolução de fosfatos naturais de baixa reatividade (BIASIOLI, 2003). Para que os prótons de H^+ se façam presentes, nos produtos da dissolução do orto-fosfato ($H_2PO_4^{2-}$), é necessário que o mesmo seja fornecido para o fosfato natural, pois não o tem em sua constituição (OBA, 2004). Neste sentido, Nying e Robinson (2006) observaram que a dissolução dos fosfatos naturais foi maior em solo que possuíam pH menor que 5. Entretanto, vale ressaltar que o pH muito baixo pode provocar efeitos negativos nas plantas, como a inibição do desenvolvimento radicular pelo aumento da disponibilidade de Al^{3+} , além da maior adsorção e precipitação do P liberado pelos fosfatos naturais no solo (BOLAN; HEDLEY,

1990). A aplicação de fosfatos naturais é recomendada em solo de pH igual ou menor a 5,5 (RAJAN et al., 2004).

Segundo Horowitz et al. (2003) na reação de dissolução de fosfatos naturais à base de apatita se destaca que, a quantidade de P ao meio depende da presença de íons de H^+ na solução e a maior liberação de P ocorre com maior concentração de H^+ . A redução do pH favorece o aparecimento de prótons, que auxiliam na dissolução da estrutura da apatita e, por consequência, ocorre maior liberação de P ao meio. Entretanto, os fosfatos naturais reativos são menos dependentes dos atributos do solo que os fosfatos apatíticos. A natureza sedimentar destas fontes e o maior número de substituições de CO_3^- por PO_4^- tornam a estrutura do cristal mais porosa e hidrolisável, o que justifica a maior solubilidade em ácido cítrico a 2%, parâmetro altamente correlacionado com a mineralogia da apatita e a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais (CHIEN; MENON, 1995; KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Quando se utiliza fosfatos naturais, os quais se beneficiam da acidez do solo para sua solubilização, observa-se decréscimo nessa solubilidade com a aplicação de calcário, principalmente em quantidades acima da dose recomendada por elevar a saturação por bases para 50%. Goedert e Lobato (1980) observaram decréscimo na produção de soja em função do aumento da dose de calcário quando a fonte de P era fosfato natural de Patos de Minas, enquanto para o superfosfato simples houve aumento de produtividade com a dose de calcário.

Os fosfatos naturais (FN) do Brasil, por não serem de origem sedimentar, tem geralmente, apresentados resultados de baixa eficiência agrônômica (GOEDERT; LOBATO, 1980; YOST et al., 1982; OLIVEIRA et al., 1984; GOEDERT; LOBATO, 1984; LEÓN et al., 1986) Os fosfatos considerados reativos os quais apresentam teor de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico igual ou superior a 30 % do teor total de P_2O_5 como os FN Gafsa, da Tunísia, Arad, de Israel e Carolina do Norte, dos Estados Unidos, e os termofosfatos apresentam resultados semelhantes aos fosfatos solúveis (YOST et al., 1982; OLIVEIRA et al., 1984; GOEDERT; LOBATO, 1984; SANZONOWICZ et al., 1987; BRAGA et al., 1991). O fosfato reativo de Bayóvar apresenta solubilidade intermediária entre as fontes de P solúveis e os fosfatos naturais. É um fosfato de origem sedimentar e caracteriza-se por apresentar alto grau de substituição isomórfica do íon fosfato por carbonato, o que lhe confere maior velocidade de reação no solo, quando comparado a outros fosfatos naturais (NOVAIS et al., 2007).

Segundo Freire et al. (2005) os fosfatos reativos tem sido uma boa alternativa para diminuir a fixação de fósforo nos solos e a deficiência na planta, e a escolha dessas fontes geralmente baseia-se na melhor relação custo benefício da adubação, onde os fosfatos reativos apresentam custos reduzidos e vem sendo amplamente estudados.

Trabalhos realizados com fosfatos naturais afirmam que em solos ácidos, pobres em fósforo, com capacidade de troca catiônica elevada e, ao mesmo tempo, com baixo poder tampão de fósforo, oferecem melhores condições para que o uso dos fosfatos naturais seja mais eficiente (CHIEN; MENON, 1995; NOVAIS; SMYTH, 1999). Outros trabalhos afirmam também que os fosfatos naturais têm sua eficiência melhorada quando aplicados a lanço e incorporados a solos ácidos, argilosos, com baixos teores de Ca trocável e P solúvel e em culturas de ciclo longo ou perenes, tolerantes à acidez e eficientes na utilização de fósforo (GOEDERT; LOBATO, 1984; HAMMOND et al., 1986; SANZONOWICZ; GOEDERT, 1986).

Avaliações do fosfato natural de Gafsa finamente moído (85% passando na peneira com malhas de 0,075mm) testado com gramíneas forrageiras tropicais, em experimentos de longa duração, indicaram que sua eficiência agrônômica foi próxima à dos fosfatos hidrossolúveis, quando incorporado a solos ácidos, anteriormente sob savana (LEÓN; FENSTER, 1980) ou cerrado (YOST et al., 1982; GOEDERT; LOBATO, 1984; SANZONOWICZ et al., 1987). Estes estudos não corroboram os trabalhos de Oliveira et al. (1984), León et al. (1986), Korndörfer et al. (1999), que evidenciam baixa eficiência agrônômica de alguns fosfatos naturais.

As fontes de fósforo menos solúveis, como os fosfatos naturais, tem sido utilizados na agricultura, devido, entre outros fatores, ao menor custo. Entretanto, segundo Novais et al. (2007) a aplicação apenas de FN de baixa reatividade não é, em muitos casos, adequada. Fato que pode estar relacionada à pequena quantidade liberada de P, que, em curto prazo, não é satisfatória para o crescimento inicial da planta e para o crescimento posterior, dada a formação de P não lábil com o tempo (NOVAIS et al., 2007).

Portanto os resultados de pesquisas e as indicações técnicas para o uso dos fosfatos naturais substituindo as fontes solúveis, ainda suscitam dúvidas quanto ao melhor manejo das fontes dos adubos fosfatados (NOVAIS; SMITH, 1999; LOPEZ, 1999). Autores afirmam existir muitas divergências sobre a melhor forma de utilização das diversas fontes fosfatadas disponíveis. Na avaliação da eficiência é importante levar-se em consideração, aspectos relacionados com o fertilizante (solubilidade e dose) e com

variáveis relacionadas ao sistema solo-planta (PROCHNOW et al., 2003; SOUSA et al., 2002; COSTA et al., 2008).

4.3 Fontes fosfatadas alternativas

Os fosfatados totalmente acidulados tem alta concentração de P solúvel e tem no seu processo de fabricação a utilização de métodos específicos de purificação e concentração da matéria-prima (rocha fosfática) e o emprego de ácidos (principalmente H_2SO_4 e H_3PO_4) para solubilização desse material (PROCHNOW et al., 2004), o que eleva bastante o custo final desses fertilizantes. Esses fosfatos são tidos como de alta eficiência, pois, uma vez aplicados ao solo, liberam prontamente grande parte do seu conteúdo em P, favorecendo a absorção pelas plantas (GOEDERT; SOUSA, 1984).

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 et al., 1990; REDDY et al., 1999; KLIEMANN; LIMA, 2001; LANA et al., 2004).

A produção dos fosfatos parcialmente acidulados (FPA) faz parte de uma rota opcional de aproveitamento de fosfatos de rocha que, para a indústria de fertilizantes, traz vantagens em relação à obtenção do superfosfato simples, uma vez que são colocadas rochas fosfáticas menos concentradas, com alto teor de impurezas, e o consumo específico de ácido sulfúrico são menores (GOEDERT; LOPES 1987). Os fosfatos parcialmente acidulados são mais baratos em relação aos fosfatos totalmente acidulados devido à menor utilização de energia e reagentes por unidade de P no produto e, frequentemente, são mais concentrados que o superfosfato simples (HAMMOND et al., 1986; CHIEN; MENON, 1995).

Pesquisas sobre a eficiência agrônômica de FPA mostram que alguns desses produtos que possuem de 40 a 50% de acidulação com H_2SO_4 ou 20 a 30% de acidulação com H_3PO_4 são tão eficientes quando os fosfatos totalmente acidulados (HAMMOND et al., 1986; BOLAN et al., 1990; CHIEN; MENON, 1995; GHOSAL et al., 2003). Ghosal et al. (2003) avaliaram a eficiência agrônômica 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% de P) em relação ao superfosfato triplo (21,8% de P), obtiveram eficiências de 54, 62 e 80% para o fosfato de rocha de Marrocos, fosfato de rocha de Mussoorie e FNPA, respectivamente.

Entretanto, em outros trabalhos os fosfatos parcialmente acidulados apresentaram eficiência agrônômica relativa muito baixa em relação à dos superfosfatos (GOEDERT; REIN; SOUSA, 1990; BATIONO et al., 1990). Os resultados obtidos com a utilização dos fosfatos parcialmente acidulados foram contraditórios, uma vez que, em algumas condições essas fontes apresentaram eficiência agrônômica relativa equivalente e até superiores a dos superfosfatos (McLEAN; LOGAN, 1970; MOKWUNYE; CHIEN, 1980; HAMMOND et al.; 1986; REIN et al., 1988). Dessa forma, a eficiência agrônômica dos fosfatos parcialmente acidulados, além das propriedades do solo, também é dependente da natureza da rocha fosfática (NOVAIS; SMYTH, 1999), tipo de ácido utilizado no processo de obtenção do fertilizante (RAJAN et al., 1996).

Novais e Smyth (1999) citam que os FPA são produtos que teriam a capacidade de suprir a demanda inicial da planta através da parte acidulada e apresentando ainda liberação lenta do restante que não foi acidulado. Dessa forma, a cinética de liberação do P pelos fertilizantes estaria em maior sincronia com a absorção e acúmulo de P pelas plantas.

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 et al., 2003). 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 durante o processo produtivo, incrementando a solubilidade do material e, conseqüentemente, aumentando a quantidade de fósforo assimilável às plantas (BÜLL et al., 1997; FERNANDÉZ; NOGUERA, 2003).

Visando avaliar as alterações químicas decorrentes da aplicação de termofosfatos em solo típico da região dos cerrados e a eficiência agrônômica desses fertilizantes, Büll et al. (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⁻³ de P. Os índices de eficiência agrônômica para TMpó e TMgr foram de 100 e 22%, respectivamente, em relação à fonte de elevada

solubilidade em água (SFT), concluindo que o produto com maior tamanho de partícula foi menos eficiente tanto no acúmulo de fósforo pela planta como na produção total de biomassa.

Resende et al. (2006) avaliaram a resposta do milho a fontes de fósforo durante três cultivos sucessivos em solos de região de cerrado e utilizando como tratamentos os seguintes fosfatos: superfosfato triplo (SFT), termofosfato magnesiano (TM), fosfato reativo de Arad (FR), fosfato natural de Araxá (FA) e testemunha. Concluíram que nos dois primeiros cultivos, 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 três cultivos, o uso das fontes SPT, TM, FR e FA correspondeu, à recuperação de cerca de 49, 54, 46 e 33% do P fornecido, respectivamente.

Na produção dos fosfatos naturais (FNs), as rochas fosfáticas são apenas moídas, envolvendo, portanto, menores custos (MALAVOLTA, 1981; GOEDERT et al., 1986). Os fosfatos naturais seriam, então, uma fonte alternativa aos fosfatos acidulados, mais baratos e agronomicamente efetivos sob certas condições de solo, cultura e manejo (SANCHEZ, UEHARA, 1980; BARBOSA FILHO, 1984; RAJAN et al., 1996; RESENDE et al., 2006).

Os fosfatos naturais geralmente são classificados, quanto à sua origem, em vulcânicos (apatitas) e sedimentares (fosforitas e bauxitas fosfóricas). Os de origem vulcânica, devido ao seu alto grau de cristalização, são poucos solúveis, enquanto os de origem sedimentar são mais solúveis pelo índice “ACS” (absolute citrate solubility). Essa diferença é decorrente das características intrínsecas dos fosfatos, sendo as mais importantes o grau de cristalinidade, o grau de substituição isomórfica de PO_4^{3-} por CO_3^{2-} e F^- na rede cristalina do mineral, a porosidade e a granulometria (CHIEN, 1977, LEHR; MCCLELLAN 1972). É importante considerar que existe grande variabilidade na composição química e mineralógica das rochas fosfatadas, e que estes atributos têm grande influência na solubilidade (VAN STRAATEM, 2002).

Uma das características importantes dos fosfatos naturais é a sua reatividade química, estimada através de sua solubilidade em solventes orgânicos (ácido cítrico 2%, ácido fórmico 2% ou citrato de amônio neutro). Os fosfatos de origem ígnea ou metamórfica, em cuja categoria se enquadram os fosfatos naturais brasileiros de importância comercial, são poucos reativos, em contraste com os fosfatos de origem

sedimentar, como os de Gafsa e Carolina do Norte, classificados como altamente reativos (SYERS et al., 1986; LEÓN et al., 1986) e tem mostrado resultados positivos para o fornecimento de P para as plantas (GOEDERT; SOUZA, 1984; KAMINSKI, 1983). 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).

O fosfato natural reativo de Gafsa, originário da Tunísia (28% de P_2O_5 total), o Djebel Onk, originário da Argélia (29% de P_2O_5 total) e o Bayovar originário do Peru (34% de P_2O_5 total) são exemplos de FNs de origem sedimentar, originados de rochas fosfáticas denominadas de francolitas ou fosforitas (HAMMOND, 1977) e são utilizados no setor agrícola como substitutos parciais ou totais dos fosfatos solúveis. O fosfato reativo de Bayóvar apresenta solubilidade intermediária entre as fontes de P solúveis e os fosfatos naturais. É um fosfato que se caracteriza por apresentar alto grau de substituição isomórfica do íon fosfato por carbonato, o que lhe confere maior velocidade de reação no solo, quando comparado a outros fosfatos naturais (NOVAIS et al., 2007).

A eficiência dos fosfatos de rocha está intimamente relacionada com o grau de substituição de fosfato (PO_4^{3-}) por carbonato (CO_3^{2-}), que gera instabilidade na estrutura cristalina da rocha (LEHR; MCCLELLAN, 1972). A dureza da estrutura cristalina é tão importante que rochas fosfáticas de origem ígnea, como a maioria das rochas nacionais, são reconhecidas por sua menor reatividade para aplicação direta como fertilizante. As rochas de origem sedimentar podem ser reativas ou não, dependendo do grau de substituição isomórfica. Assim sendo, as rochas fosfáticas podem ser divididas em rochas de alta, média, baixa e muito baixa reatividade. Fazem parte do grupo das rochas de alta eficiência aquelas provenientes da Tunísia (Gafsa), Israel (Arad), Peru (Sechura, Bayovar) e Carolina do Norte (USA) (Léon et al, 1986). As do segundo grupo são as rochas vindas do Centro da Florida e Tennessee (USA), Pesca e Huila (Colombia); as de baixa eficiência são a de Patos de Minas, Abaeté e as de muito baixa são a de Jacupiranga, Catalão e Tapira. Segundo Lehr e McClellan (1972) poderíamos obter maiores ganhos com a adubação fosfatada, caso se utilizasse um fosfato natural com eficiência agrônômica superior a apresentada pelos fosfatos naturais brasileiros, visto serem estes, por natureza geológica, de baixa reatividade, variando de 23 a 42 %, em comparação com o valor de 100% dos fosfatos naturais Argélia e Marrocos.

A eficiência agronômica de fosfatos é afetada por vários fatores; a origem geológica, a granulometria e a solubilidade, pelas características físicas e químicas do solo (textura, mineralogia, capacidade de adsorção de ânions, pH, teores de Ca, Mg, P), pelas espécies cultivadas, pelo modo de incorporação ao solo e tempo de reação (THOMAS; PEASLEE, 1973; HAMMOND et al., 1986; KAMINSKI; MELLO, 1984; GOEDERT; LOBATO, 1984).

Resende et al. (2006) aplicaram o fosfato natural reativo de Arad a lanço, em área total e incorporado ou localizado no sulco. Esses autores observaram maior produtividade de grãos de milho quando o fosfato de Arad foi espalhado e incorporado, em comparação ao aplicado localizadamente. Soares et al. (2000) avaliaram a eficiência do fosfato natural de Gafsa farelado em recuperação de pastagem degradada, e observaram resposta superior em produção de matéria seca de *Brachiaria decumbens* quando esse fosfato foi espalhado e incorporado ao solo, em relação ao não incorporado. Esse resultado indica que o maior contato com o solo proporcionou aumento na solubilização do FN e na disponibilidade de P para as plantas (CHIEN; MENON, 1995a, 1995b; RAJAN et al., 1996; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2008) e, conseqüentemente, maior absorção do P proveniente do FN pelas plantas, em razão do maior contato das raízes com o FN (KHASAWNEH; DOLL, 1978).

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).

Korndörfer et al. (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 efeito residual.

Pesquisas tem demonstrado que a maneira de melhorar a eficiência dos fosfatos naturais é sua aplicação juntamente com uma fonte de P solúvel em água em solos ácidos ou mesmo em solos ligeiramente alcalinos. A maioria desses estudos tem sido

realizada em condições de solos, assim como de fontes naturais de fósforo distintas às do Brasil.

Chien et al. (1987) avaliaram a eficiência agronômica do superfosfato triplo (TSP) e do fosfato de rocha da Carolina do Norte (FR com alta reatividade) para a cultura do milho em casa de vegetação. Concluíram que a eficiência agronômica da mistura entre TSP e o FR foi maior do que a eficiência agronômica dessas fontes aplicadas de forma isolada, quando a proporção entre o TSP e o FR foi de 1:1 ou 1:2, demonstrando a existência de um efeito sinérgico quando essas fontes são aplicadas conjuntamente. Dentre as prováveis explicações para esse resultado, pode-se citar a ação da dissolução do fosfato monocálcico, que compõe a fração solúvel da mistura, auxiliando a dissolução da fração não solúvel por meio da formação de H_3PO_4 ; e o estímulo ao crescimento inicial do sistema radicular das plantas pela presença do P solúvel em água.

Muito embora inúmeros estudos tenham sido conduzidos no mundo para avaliara à eficiência agronômica das diferentes rochas fosfatadas, existe ainda a necessidade de integrar todos os fatores em modelo (sistema) que possa antecipar a eficiência agronômica das rochas fosfatadas, possibilitando assim condições para se decidir sobre a viabilidade de utilização em situações específicas de rochas fosfatadas, solo, manejo, clima e cultura (SMALLBERGER et. al., 2006).

Diante do exposto, conclui-se que eficiência agronômica de fertilizantes alternativos é afetada por vários fatores e a grande variação na solubilidade dos fosfatos alternativos, seja ele natural ou industrializado, a interação do fertilizante com os componentes do solo, a forma de utilização, e as características da planta cultivada, são fatores que reforçam ainda mais a necessidade de estudos voltados para adubação fosfatada para que estas fontes tornem-se viáveis sob o ponto de vista agronômico em comparação às fontes de elevada solubilidade.

4.4 Eficiência agronômica de fosfatos

A característica que melhor avalia uma fonte de fósforo, do ponto de vista agronômico, é a sua eficiência em fornecer o nutriente para as plantas, ou seja, sua capacidade de provocar o maior acréscimo de rendimento por unidade de P aplicado (GOEDERT; SOUSA, 1984). Os principais fatores que influenciam a eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados são: as propriedades dos fertilizantes, as

propriedades do solo, as práticas de manejo e a espécie vegetal (CHIEN et al., 1990; MAHIMAIRAJA et al., 1995; HEDLEY; BOLAN, 1997).

A eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais é normalmente muito baixa caracterizada pela forte tendência do P aplicado ao solo reagir com substâncias formando compostos de baixa solubilidade, principalmente em solos onde há predomínio de minerais sesquióxidos (BÜLL et al., 1998; NOVAIS; SMYTH, 1999). Isso implica no aumento da quantidade de P aplicado ao solo, em geral, maior que a necessidade da cultura, pois é fundamental saturar os compostos responsáveis pela fixação do P para que este possa ter uma concentração que atenda as demandas da cultura (FURTINI NETO, 2001).

No Brasil, as pesquisas com avaliação agrônômica de fontes de fósforo aumentaram consideravelmente a partir do início da década de setenta, em face da elevação dos preços dos fertilizantes fosfatados solúveis e da dependência do país de seu suprimento do exterior (BRAGA et al., 1980; DEFILIPPE, 1990). O requerimento de grandes quantidades de fosfatos na correção da fertilidade dos solos brasileiros, e a ausência de reservas abundantes de rochas fosfatadas de boa qualidade no País, associados ao elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para aperfeiçoar a eficiência no uso de adubos fosfatados (RESENDE et al., 2006).

Nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas, como as rochas fosfáticas em estado natural (fosfato natural), aumentou acentuadamente, embora esses produtos tenham baixa solubilidade em água quando comparados aos fosfatos solúveis (HOROWITZ ; MEURER, 2003). A produção de fertilizantes fosfatados gera grandes quantidades de rejeito com quantidades consideráveis de P, a utilização destes rejeitos na agropecuária pode ser uma das soluções para este problema (OBA, 2004).

A eficiência agrônômica de fosfatos pode ser avaliada por diversos índices, dentre os quais se destacam a solubilidade em ácido cítrico a 2%, o índice de eficiência agrônômica (IEA) e o equivalente em superfosfato triplo (EqST), cuja eficiência agrônômica é aferida por meio de índices estabelecidos pela comparação com um fosfato padrão, em geral o superfosfato triplo. A eficiência da aplicação do fertilizante fosfatado ao solo e as necessidades nutricionais das plantas, influenciam na seleção de técnicas de manejo da adubação fosfatada. Assim, os métodos de avaliação são baseados em possíveis aumentos da quantidade de matéria seca proporcionado pela adubação, fósforo acumulado

ou produtividade, proporcionados pela aplicação de fósforo em relação a uma fonte padrão de fósforo (KORNDORFER et al., 1997).

O ácido cítrico a 2% (pH 2,3) apresenta-se predominantemente na espécie $\text{H}_3\text{citrato}^-$ e em menor proporção na espécie $\text{H}_2\text{citrato}^-$. A primeira espécie forma preferencialmente complexos com Ca^{2+} e Cu^{2+} , a segunda com Ca^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} , mas nenhuma das duas espécies forma complexos com o Al^{3+} . Consequentemente, é de se esperar maior solubilidade dos fosfatos de cálcio do que do fosfato de ferro e alumínio e maior do fosfato de ferro do que do fosfato de alumínio.

A solubilidade total em ácido cítrico ocorre em termofosfatos, farinha de ossos e fosfatos bi e tricálcicos, a solubilidade mediana em fosforitas e a baixa solubilidade em apatitas (OLIVEIRA et al., 1984). Goedert e Lobato (1984) afirmam que produto com baixa solubilidade em ácido cítrico e citrato neutro de amônio, apresenta poucas chances de apresentar uma eficiência agrônômica aceitável (GOEDERT; LOBATO, 1984).

A solubilidade dos fosfatos em ácido cítrico a 2% é considerada um critério indireto de avaliação da eficiência agrônômica de fosfatos. Braga (1980) considera que a solubilidade de fosfatos em ácido cítrico jamais servirá para caracterizar a eficiência agrônômica, devendo ser usada apenas como indicativo para diferenciar os fertilizantes do ponto de vista comercial. Goedert e Lobato (1984) obtiveram estreitas correlações entre o índice de eficiência agrônômica e a solubilidade em água e em ácido cítrico a 2% de fosfatos parcialmente acidulados, considerando os procedimentos válidos para avaliar a eficiência do fertilizante em curto prazo. Da mesma forma, Oliveira et al. (1984) obtiveram estreita correlação entre a eficiência agrônômica de fosfatos e sua solubilidade em ácido cítrico, com exclusão de fosfatos de alumínio, não solúveis em ácido cítrico.

A eficiência agrônômica de fosfatos, estimada pelo índice de eficiência agrônômica (IEA), também chamada de eficiência agrônômica relativa (EAR), foi proposta por Barnes e Kamprath (1975) e empregada por diversos autores brasileiros (GOEDERT; LOBATO 1984, BRAGA et al. 1991, KORNDÖRFER et al. 1999). O modelo pressupõe que a quantidade de P nativo do solo absorvida pelas plantas é a mesma em qualquer dose de nutriente empregada.

Uma das propriedades mais importante dos fertilizantes fosfatados em relação ao seu desempenho agrônômico é a solubilidade em água. Quando um fertilizante fosfatado de qualquer origem é adicionado ao solo, ocorre uma sequência de

eventos físico-químicos que transformam o fosfato em substâncias fosfatadas complexas, as quais passam a governar a disponibilidade desse nutriente no solo. Assim, se forem adicionados fosfatos solúveis em água, a reação no solo é rápida e os novos produtos formados conseguem manter uma solução saturada em P em torno da região de dissolução do grânulo. Isso cria um gradiente osmótico que promove o deslocamento da água em sua direção, e ao mesmo tempo há a difusão da solução da região mais concentrada para regiões de menor concentração. Isto permite que soluções com P suficiente para atender a demanda de plantas quando o sistema radicular atinge essas regiões. O evento prossegue até que haja diluição da solução com P, ou se completem as reações com os constituintes do solo e extinga o potencial osmótico. Com resultado, o pH do sítio onde ocorreu a reação será menor que o original (SAMPLE et al., 1980).

Se o fertilizante for de baixa solubilidade haverá um tipo de reação similar, mas neste caso, a solução será mais diluída e o potencial osmótico será menor, ambos ditados pela solubilidade do produto utilizado. Por isso, o movimento de água na direção do fertilizante será menor e esta solução influenciará volumes muito menores de solo ao redor do grânulo de fertilizantes, de modo que as rotas do movimento de P, serão a difusão na solução e o fluxo de massa, que é muito pequeno no P e, por isso, sua disponibilidade dependerá da quantidade de água no solo, o que facilitará o acesso da raiz ao nutriente (SAMPLE et al., 1980).

Como os fosfatos solúveis reagem com maior intensidade no solo e, normalmente, fornecem P ao sistema em taxas maiores, são fontes mais eficientes do que os fosfatos naturais em curto prazo. Por isso, a eficiência agrônômica dos fosfatos em geral está diretamente correlacionada com a sua solubilidade em água (GOEDERT et al., 1986; SOUSA et al., 2002)

Alguns resultados experimentais indicam que fontes de P com baixa solubilidade em água foram mais eficientes que fontes de elevada solubilidade em água em solos de elevada capacidade de fixação de P (MCLEAN; WHEELER, 1964; MCLEAN et al., 1965; MCLEAN; BALAM, 1967; MCLEAN; LOGAN, 1970). No entanto resultados opostos, ou seja, fontes com elevada solubilidade em água apresentando maior eficiência agrônômica relativa (EAR) em solos com maior capacidade de fixação de fósforo, foram obtidos por Terman e Allen (1967), Terman et al. (1964) e por Hammond et al. (1980).

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 o transporte, o manuseio e o armazenamento (PROCHNOW et al., 2003).

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 et al., 1990; REDDY et al., 1999; ZAPATA; ROY, 2004; STAMFORD et al., 2007). Alternativas de aproveitamento de rejeitos da indústria dos fertilizantes fosfatados solúveis ainda são pouco estudadas.

Neste contexto, sabe-se que no Brasil, a rota sulfúrica para a produção de fertilizantes fosfatados gera grandes volumes de rejeitos e entre esses estão materiais ainda relativamente ricos em P, cujo aproveitamento não é possível pelos atuais métodos industriais pela limitação econômica, representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, devido aos grandes volumes envolvidos.

A rocha fosfática requer processamento para reduzir o conteúdo de minerais acessórios (impurezas) incluindo o quartzo, chert, argila, feldspato, mica, calcita e dolomita. Na indústria de fertilizantes é necessário que os minérios de fosfato tenham teor de mais de 30% de P_2O_5 , razão CaO/P_2O_5 menor do que 1,6, e teor de MgO inferior a 1%. Caso os minérios de fosfato não preencham estes critérios, é necessário remover suas impurezas por alguns meios de beneficiamento. (SIS; CHANDER, 2003). Quando a rocha fosfática possui razão CaO/P_2O_5 maior que 1,6 utiliza-se elevada quantidade de ácido sulfúrico, diminuindo o retorno econômico para a produção de fertilizantes fosfatados.

A única rota hidrometalúrgica de produção de ácido fosfórico seguida no Brasil é a sulfúrica. Nos últimos anos, porém, vêm sendo desenvolvidas pesquisas, em laboratório, para avaliação da viabilidade técnico-econômica dos processos que utilizam os ácidos clorídrico e nítrico, alternativas que apresentam a vantagem de melhor aproveitamento do minério e de rejeitos, recuperação de subprodutos e redução de impactos ambientais (LAPIDO-LOUREIRO, 1996; PEREIRA, 2003; ARAÚJO et al., 2004; LAPIDO-LOUREIRO, 2005).

Segundo Dias e Lajolo (2009) a produção de fertilizantes fosfatados solúveis trata-se de uma cadeia com grande geração de resíduos sólidos e também de deposição em diferentes fases da sua industrialização. Em média, para se atingir a etapa de beneficiamento de rocha fosfática, sabe-se que em termos de proporção 1,6 milhões de m³/ano de produção geram 9 milhões de m³ de rejeitos, minérios marginais e estéreis de sensível deposição, que, estocados em pilhas, ocupam, em volume, grande parte das áreas das minas.

Associados ao beneficiamento mineral, o grande volume de rejeitos está na raiz dos principais impactos ambientais, que se desdobram em questões relacionadas ao uso da terra e ao uso da água, já que as barragens de rejeitos e seus reservatórios ocupam terras agricultáveis ou áreas de conservação, além da apropriação de trechos do próprio corpo d'água, convertidos em componente do empreendimento. A decantação requer superfícies extensas para a finalidade (DIAS; LAJOLO, 2009).

Com a legislação ambiental cada vez mais rígida, os prejuízos advindos de seu não cumprimento podem apresentar um custo muito elevado o que vêm incentivando, a cada dia, a indústria a procurar sistemas eficazes que provoquem a redução de seus impactos ambientais, com custo de mercado compatível. Os trabalhos de Oba (2000) e Silverol et al. (2007), afirmam que o processo Humifert é uma alternativa ao aproveitamento de materiais rejeitados no processo convencional de produção de fosfatos, como minérios inadequados às condições usuais da usina de beneficiamento; rejeitos com teores baixos de P₂O₅ (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 P₂O₅, que não interessam às grandes mineradoras, mas capazes de suprir localizadamente a demanda por fertilizantes fosfatados.

Sendo assim, a implantação de um sistema eficiente para a gestão destes resíduos, evita danos ao meio ambiente e permite a criação de uma política de reutilização e reciclagem de resíduos, reduzindo o volume a ser estocado. É necessário, portanto, o desenvolvimento de pesquisas sobre avaliação da eficiência agronômica desta categoria de rejeitos, nas mais distintas condições de solo, para caracterizar seu desempenho agronômico, ou seja, a eficiência destes no sistema solo-planta e posteriormente validar seu uso na agricultura.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e Caracterização dos Experimentos

Os experimentos foram conduzidos no período de 18 de novembro de 2012 a 22 de março de 2013, em casa de vegetação telada pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas- UNESP, campus de Botucatu – SP, que apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 22°52'55'' latitude sul e 48°26'22'' de longitude oeste, altitude 786 m, sendo o clima classificado como temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno (Cwa – Koppen) e a temperatura média mais quente superior a 22° C (CUNHA et al., 1999).

No período da condução do experimento, as médias das temperaturas mínima e máxima foram de 19,1 °C e 29,2 °C, respectivamente. Os dados mensais referentes às temperaturas durante os meses de condução do experimento estão representados na Figura 1.

Os experimentos realizados tiveram como objetivo principal avaliar a eficiência agronômica das fontes de fósforo testadas em duas condições de solo: na ausência e presença de aplicação de calcário. A cultura utilizada como planta teste foi o milho (*Zea mays* L), híbrido simples de ciclo precoce 2B810 PW, por ser uma cultura responsiva à adubação fosfatada, além de apresentar ciclo de vida relativamente curto.

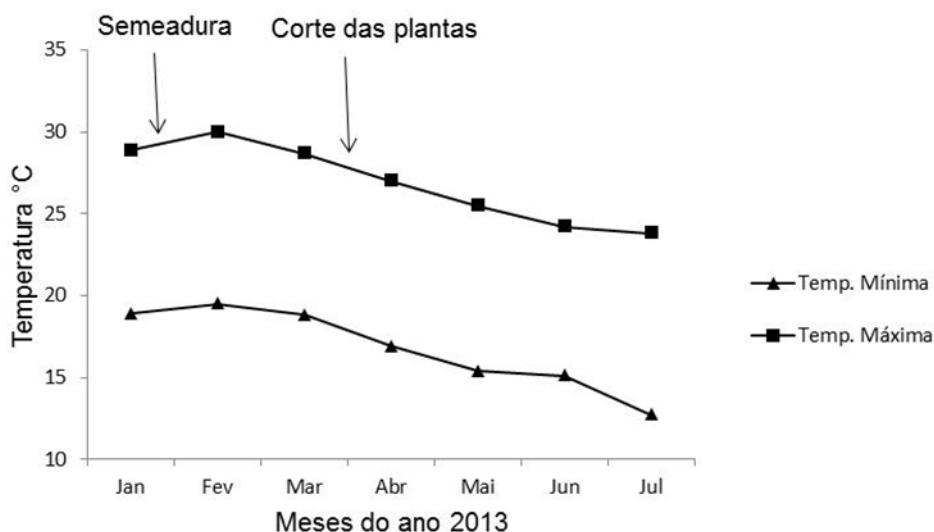


Figura 1. Representação gráfica das temperaturas máximas e mínimas do município de Botucatu-SP, nos meses do ano de 2013.

5.2 Caracterização do solo

Para a condução dos experimentos foi utilizado um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) classificado de acordo com Embrapa (2006), coletado no município de Botucatu-SP. Este solo foi escolhido principalmente devido ao baixo teor de fósforo, característica considerada adequada para o objetivo desta pesquisa. As amostras de terra foram coletadas à profundidade de 0 – 0,2 m, secas ao ar e em seguida homogeneizadas. Posteriormente, foram retiradas subamostras, passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura e submetidas à caracterização química (Tabela 1).

A caracterização química das amostras de solo foi realizada utilizando os procedimentos analíticos descritos por Raij et al. (2001). Foram determinados pH em CaCl_2 , matéria orgânica, P (resina), K, Ca, Mg e calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%). O valor pH do solo foi determinado em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ na relação de 1: 2,5. Os elementos fósforo, potássio, cálcio e magnésio foram extraídos pelo método da resina trocadora de íons, sendo quantificados por espectrometria de absorção atômica e o fósforo por colorimetria.

Tabela 1. Características químicas das amostras de solo utilizadas nos experimentos.

pH	M.O.	P resina	P rem	Al	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----								%
4,0	30	4,0	21,98	19	67	0,3	3	1	4,3	71,3	6	

A caracterização granulométrica foi realizada pelo método do densímetro segundo Embrapa (1997), apresentando os seguintes resultados: 669, 57 e 274 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente. Sendo classificado como classe de textura média de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (EMBRAPA, 1999).

5.3 Caracterizações das fontes de fósforo

Dentre as fontes de fósforo utilizadas nos experimentos duas (2) fontes são subprodutos (rejeitos) da indústria da produção do superfosfato triplo e foram denominados: (i) fosfato precipitado 1 (FP1), (ii) fosfato precipitado 2 (FP2). Foi utilizado também um fosfato reativo (FR) e o superfosfato triplo (SFT), o qual foi utilizado como fonte referência de fósforo.

As avaliações das fontes fosfatadas testadas quanto aos teores de nutrientes são apresentados na Tabela 3 e quanto aos teores de P₂O₅ totais e solúveis em água, em citrato neutro de amônia (CNA + H₂O) e em ácido cítrico (AC 2%), foram realizadas seguindo-se a metodologia oficial do Ministério da Agricultura (BRASIL, 1983) na Tabela 2.

As avaliações das fontes fosfatadas quanto à granulometria foram realizadas passando-se uma massa conhecida de cada amostra fosfatada por peneiras com tamanhos de abertura de malha decrescente. Pesando-se a massa retida em cada peneira, expressou-se cada fração em termos percentuais (Tabela 4). As fontes fosfatadas FP1, FP2 e FR foram utilizadas na forma farelada e o SFT na forma granulada, forma esta a mais utilizada na agricultura.

Tabela 2. Teores de P₂O₅ total, solúvel em ácido cítrico a 2%, solúvel em CNA + H₂O e solúvel em H₂O das fontes utilizadas nos experimentos.

Amostras ⁽¹⁾	P ₂ O ₅ Total	P ₂ O ₅ -AC	P ₂ O ₅ -CNA+H ₂ O	P ₂ O ₅ - H ₂ O
	-----%			
FP 1	9,10	2,62	3,53	0,00
FP2	14,40	5,97	11,68	0,00
FR	29,40	6,87	5,77	0,00
SFT	48,08	17,04	45,07	37,34

(1) FP 1: Fosfato Precipitado 1; FP 2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo.

Tabela 3. Teores de nutrientes das fontes de fósforo testadas.

Amostras ⁽¹⁾	K ₂ O	S-SO ₄	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	-----%								
FP 1	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05	0,08
FP 2	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08	0,07
FR	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06	0,09
SFT	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08	0,02

(1) FP 1: Fosfato Precipitado 1; FP 2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo.

Tabela 4. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas.

Fontes ⁽¹⁾	Peneira 4 mm ⁽²⁾		Peneira 1 mm ⁽³⁾	
	FP 1	100		99,26
FP 2	88,43		58,17	
FR	100		99	
SFT	74,63		6,35	

(1)FP 1: Fosfato Precipitado 1; FP 2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo. (2) ABNT 5 (3) ABNT 18.

5.4 Experimento 1 – Milho na ausência de calcário no solo

As amostras do Latossolo solo utilizado foram acondicionadas em vasos de polietileno com capacidade de 20 dm³ de solo. Neste estudo não se realizou a aplicação do material corretivo de acidez, mantendo-se as condições iniciais da acidez ativa do solo, com pH igual a 4,0.

A adubação básica foi realizada com a incorporação dos nutrientes em área total do vaso, com o auxílio de lona plástica, aplicando-se 120 mg/dm³, por vaso, de potássio aplicados na forma de cloreto de potássio KCl (58% de K₂O)

e 2 g/vaso de micronutrientes na forma de Fritas (FTE BR-10 que contém 7% Zn, 2,5 % B, 1% Cu, 4% Fe, 4% Mn e 0,1 Mo) com quantidades idênticas para todos os tratamentos, além da aplicação das doses de fósforo testadas (0, 40, 80 e 120 mg dm⁻³ P).

Foram semeadas cinco (5) sementes de milho por vaso e, após quinze (15) dias da semeadura, foi feito o desbaste, deixando-se duas (2) plantas por vaso durante sessenta (60) dias. Aos quinze (15) dias após a semeadura realizou-se a primeira adubação de cobertura com nitrogênio na dose de 30 mg dm⁻³/vaso na forma de sulfato de amônio (NH₄)₂SO₄ (20% de N). Durante o crescimento da cultura foram realizadas irrigações diárias, mantendo-se a umidade a 70% da capacidade de campo, e aplicações quinzenais de nitrogênio na dose de 30 mg dm⁻³/vaso na forma de sulfato de amônio (NH₄)₂SO₄ (20% de N) até o final do ciclo.

5.5 Experimento 2 – Milho na presença de calcário no solo

As amostras do solo utilizado foram acondicionadas em vasos de polietileno com capacidade de 20 dm³ de solo. Com base nos resultados da análise química do solo realizou-se a aplicação do corretivo de acidez, utilizando-se calcário dolomítico (PRNT = 95; CaO = 29%; MgO = 18%; PN= 96%), cuja quantidade foi calculada para atingir 70 % da saturação por bases (RAIJ et al., 1996).

Após aplicação do calcário, as unidades experimentais foram incubadas por sessenta e cinco (65) dias, em temperatura ambiente com umidade de aproximadamente 70% da capacidade de retenção de água. Em seguida, realizou-se a adubação básica com a incorporação dos nutrientes em volume total do vaso, com o auxílio de lona plástica, aplicando-se 120 mg dm⁻³/vaso de potássio aplicados na forma de cloreto de potássio KCl (58% de K₂O) e 2 g/vaso de micronutrientes na forma de Fritas (FTE BR-10), com quantidades idênticas para todos os tratamentos, além da aplicação das doses de fósforo testadas (0, 40, 80 e 120 mg dm⁻³ P).

Foram semeadas cinco (5) sementes de milho por vaso e após quinze (15) dias da semeadura foi feito o desbaste deixando-se duas (2) plantas por vaso durante sessenta (60) dias. Aos quinze (15) dias após a semeadura realizou-se a primeira adubação de cobertura com nitrogênio na dose de 30 mg dm⁻³/vaso na forma de sulfato de amônio. Durante o crescimento da cultura foram realizadas irrigações diárias, mantendo a

umidade a 70% da capacidade de campo, e aplicações quinzenais de nitrogênio na dose de 30 mg dm^{-3} /vaso na forma de sulfato de amônio até o final do experimento.

5.6 Delineamento Experimental

Os experimentos foram conduzidos sob delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial 4×4 , com quatro repetições, totalizando 64 parcelas experimentais para cada experimento (Figura 2). Os tratamentos foram compostos de quatro fontes de fósforo: (i) fosfato precipitado 1, (ii) fosfato precipitado 2, (iii) fosfato reativo e (v) superfosfato triplo, quatro doses das fontes de fósforo testadas (0, 40, 80 e $120 \text{ mg dm}^{-3} \text{ P}$).

Os dados foram submetidos à análise de variância. Os parâmetros qualitativos foram submetidos ao teste de comparação de médias através do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o pacote estatístico ASSISTAT, versão 7.7 beta.



Figura 2. Fotos dos experimentos 1 e 2 aos 52 dias após a semeadura da cultura do milho.

5.7 Avaliações

5.7.1 Avaliações na planta

5.7.1.1 Altura e diâmetro do colmo

Aos sessenta (60) dias após a emergência do milho foram realizadas as medições de altura e diâmetro do colmo. A altura foi medida, com o auxílio de uma régua milimetrada, compreendendo a distância entre a superfície do solo e a extremidade da folha completamente expandida, e o diâmetro do colmo foi determinado, com o auxílio de um paquímetro digital, medindo-se o primeiro entrenó acima do colo da planta.

5.7.1.2 Massa de matéria Seca da parte aérea (MSPA)

Aos sessenta (60) dias após a emergência do milho foi realizada a colheita das plantas para a determinação da massa de matéria seca, coletando-se a parte aérea das mesmas. Os materiais vegetais foram acondicionados em sacos de papel e encaminhados para o laboratório, onde foram lavadas em água de torneira com detergente neutro e, em seguida com água deionizada. Após a lavagem foram colocadas para secar em estufa de ventilação forçada a 60°C até peso constante, sendo posteriormente pesadas.

5.7.1.3 Teores de nutrientes e acúmulo de fósforo

Após a determinação da massa de matéria seca da parte aérea do milho, foram retiradas amostras do material vegetal que foram trituradas em moinho tipo Wiley e posteriormente mineralizadas por digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995). Do

extrato obtido, foram determinados os teores de macronutrientes pelo método descrito por Malavolta et al. (1997). Multiplicando o teor de fósforo (g kg^{-1}) encontrado em cada subamostra pela massa de matéria seca (g vaso^{-1}) produzida por cada vaso e dividindo-se por 1000, obteve-se o acúmulo de P (mg vaso^{-1}) da parte aérea das plantas.

5.7.1.4 Índice de Eficiência Agronômica (IEA)

A eficiência dos fertilizantes fosfatados foi avaliada através do índice de eficiência Agronômica (EA), calculada com base no diferencial de produção obtido entre os fosfatos testados e o superfosfato triplo, considerando-se tanto a produção média de matéria seca da parte aérea, como a de fósforo acumulado pela parte aérea segundo Novais e Smyth (1999). Conforme a seguinte fórmula:

$$EA = \left(\frac{\text{Produção Fonte} - \text{Produção Testemunha}}{\text{Produção Super Triplo} - \text{Produção Testemunha}} \right) \times 100$$

5.7.2 Avaliações no solo

5.7.2.1 Determinações químicas

A amostragem foi realizada em cada unidade experimental com o auxílio de um trado, sendo cada amostra uma mistura de terra retirada do volume total do vaso, antes da semeadura e, posteriormente, no final do ciclo da cultura. Nas amostras de solo foram realizadas as seguintes determinações: pH em CaCl_2 , P, K, Ca e Mg extraídos por resina trocadora de íons, $\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$ por acetato de cálcio, conforme Rajj et al. (2001).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Atributos químicos do solo

6.1.1 Acidez do solo, fósforo solúvel e bases trocáveis

Verifica-se efeito da aplicação do corretivo de acidez do solo na elevação do valor pH, em comparação a condição de acidez inicial do solo, confirmando as duas condições distintas de acidez do solo utilizadas neste estudo, para testar a eficiência agronômica das fontes de fósforo utilizadas. Na ausência da aplicação de calcário o pH inicial era de 4,1 e com a aplicação do calcário elevou-se em média para 6,2 (Tabela 5).

Segundo Caires et. al. (2005) a calagem é a prática mais comumente utilizada para neutralizar a acidez, aumentar a disponibilidade de nutrientes, diminuir o teor de elementos tóxicos, melhorar o ambiente radicular e restaurar a capacidade produtiva dos solos. Neste estudo se observou a relação existente entre acidez e a disponibilidade de fósforo através do aumento do teor de fósforo solúvel na de presença de calcário, principalmente para as fontes FP1 e FP2 (Tabela 6).

Não se observou efeito significativo da interação dose x fonte para o valor pH do solo, na condição de presença de calcário. Na ausência de calcário, observou-se que a fonte FP1 apresentou diferença estatística em relação ao pH do solo, em

comparação as demais fontes testadas a partir da primeira dose de fósforo aplicada (Tabela 5).

A reação do solo após a dissolução dos fertilizantes é o resultado da interação do pH do próprio fertilizante e do pH do solo. Por este motivo a acidificação é mais pronunciada próximo da região do grânulo, onde a relação volume de solo/grânulo é menor. À medida que aumenta a distância do grânulo, a acidificação causada pela dissolução do grânulo passa a ser dissipada até não mais causar qualquer alteração de pH.

Gilkes e Lim-Nunez (1980) citam que o superfosfato simples não apresenta grande influência sobre o pH do solo, o mesmo foi observado neste estudo para o superfosfato triplo, que não apresentou efeito significativo sobre o pH do solo sob doses crescentes deste fertilizante (Tabela 5).

Tabela 5. Valores pH do solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e de ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
Presença de calcário – NS				
0	6,1	6,1	6,1	6,1
40	6,3	6,4	6,1	6,1
80	6,1	6,2	6,3	6,2
120	6,1	6,3	6,2	6,2
CV (%) 2,6				
Ausência de calcário				
0	4,1 a	4,1 a	4,1 a	4,1 a
40	4,1 b	4,5 a	4,1 b	4,1 b
80	4,1 b	4,5 a	4,1 b	4,2 b
120	4,1 b	4,7 a	4,2 b	4,3 b
Efeito de dose	NS	Q*	NS	L*
CV (%) 2,5				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; NS – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

A extração de fósforo por resina indica efeito semelhante das fontes de fósforo quanto ao teor de P, em relação às doses de fósforo e as condições de acidez do solo, observando-se incremento do teor de fósforo com o aumento das doses (Tabela 6).

Observou-se incremento linear significativo no teor de fósforo no solo para as fontes FP1, FR e SFT, com o aumento das doses do elemento, corroborando os resultados encontrados por Fageria et al. (1999). Exceto a fonte FP2 que, na presença de

calcário, apresentou efeito quadrático e, na ausência de calcário, não apresentou significância (Tabela 6). Nota-se que em todas as doses, o teor de P no solo não atingiu o teor estimado, provavelmente, esteja relacionado ao processo de insolubilização que, segundo Lin et al. (1983), ocorre quando há alta concentração de P no meio (Figura 3).

Tabela 6. Teor de fósforo no solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- mmol/dm ³ -----				
Presença de calcário				
0	1,8 a	1,7 a	1,6 a	2,0 a
40	16,4 ab	26,3 a	12,9 ab	9,8 b
80	26,2 b	53,2 a	55,4 a	21,6 b
120	34,5 b	66,7 a	43,8 b	14,6 c
Efeito de dose	L **	L**	Q*	L*
CV (%) 30,0				
Ausência de calcário				
0	1,5 a	2,5 a	1,3 a	1,4 a
40	4,0 a	21,8 a	14,1 a	9,8 a
80	28,3 a	42,2 a	24,8 a	22,4 a
120	38,6 a	62,5 a	12,0 b	51,2 a
Efeito de dose	L**	L**	NS	L**
CV (%) 52,5				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

Os teores de fósforo no solo, foram superiores para as fontes FP1, FP2, indicando maior solubilização destas fontes em solo com pH corrigido. Para a fonte FR o incremento no teor de P foi sensivelmente superior na condição de ausência de calcário no solo, corroborando os estudos feitos por Goedert e Lobato (1980), que avaliaram a eficiência agrônômica de onze fontes de fósforo num solo de cerrado e evidenciaram que a eficiência dos fosfatos naturais é maior com o aumento da acidez do solo.

A reação de dissolução de fosfatos naturais à base de apatita segundo Horowitz et al. (2003), destaca que a quantidade de P ao meio depende da presença de íons de H⁺ na solução e a maior liberação de P ocorre com maior concentração de H⁺. A redução do pH favorece o aparecimento de prótons, que auxiliam na dissolução da estrutura da apatita e, por consequência, ocorre maior liberação de P ao meio. Sabe-se

que o fosfato natural de baixa reatividade, apresenta menor solubilidade em água, configurando-se solúvel em meio ácido; trata-se, portanto, de um composto de difícil solubilização, ao contrário do que normalmente ocorre com os fertilizantes industriais acidulados (OBA, 2004).

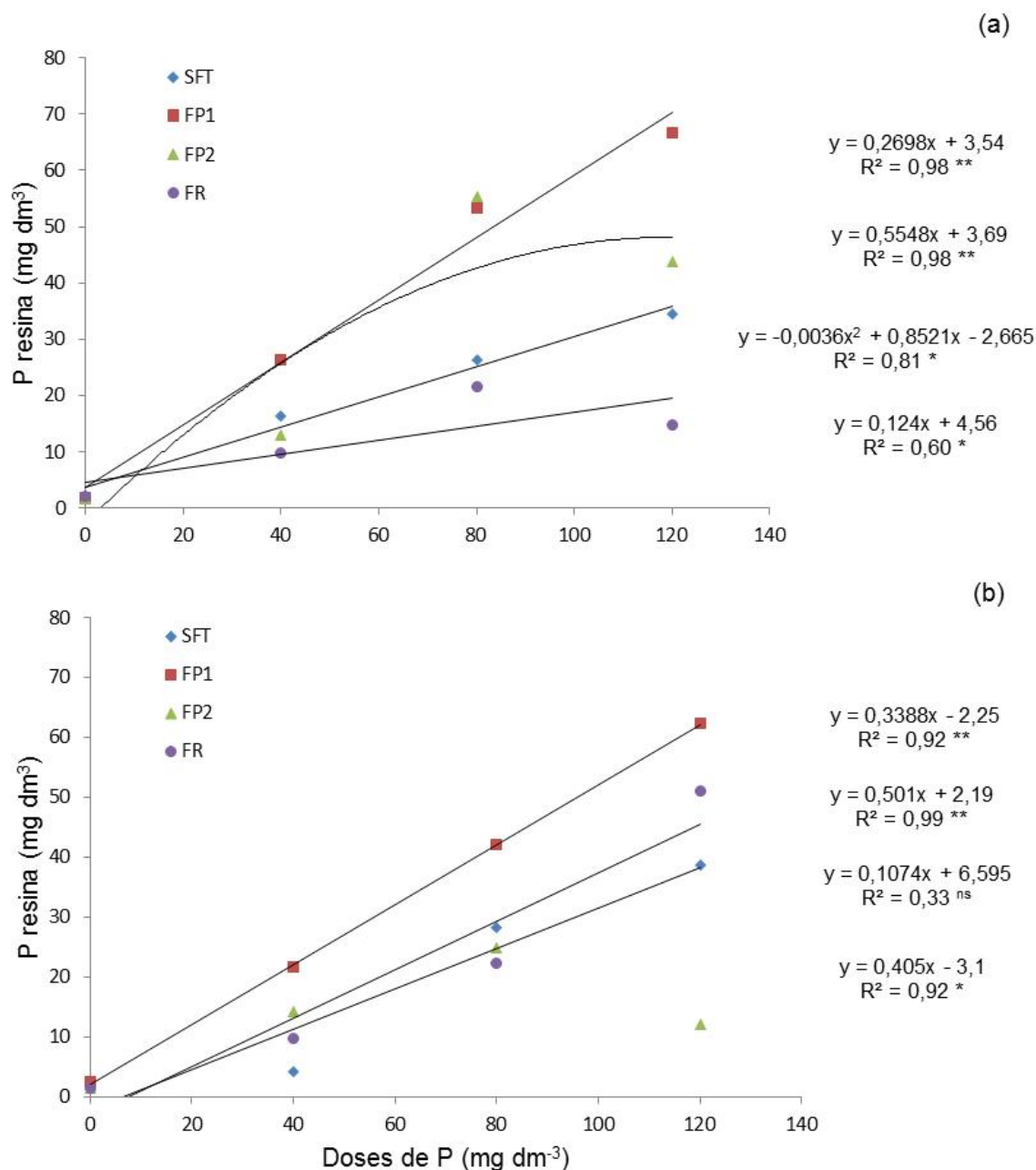


Figura 3. Efeito das doses de fósforo no teor de fósforo resina, (a) presença de calcário no solo e (b) ausência de calcário.

A aplicação das fontes FP1 e FP2, na presença de calcário, aumentou significativamente a disponibilidade de P em todas as doses, em comparação a fonte SFT. Este comportamento talvez possa ser explicado pelo método utilizado para quantificar o fósforo disponível no solo, neste caso o método da resina pode ter superestimado os teores de fósforo para a fonte FP1 e FP2 ou subestimado os teores de fósforo para a fonte SFT. No entanto, os resultados de pesquisa, principalmente em solos com baixa disponibilidade de P, apontam a resina de troca iônica como uma alternativa adequada para extração de fósforo nessas condições. A reação de extração do fósforo pela resina age de forma similar à absorção de fósforo pela planta, pois à medida que o fósforo é removido da solução, há reposição por dissolução desse fósforo lábil, ou seja, fósforo que está disponível à planta (RAIJ, 2011).

Na ausência de calcário no solo o comportamento das fontes de fósforo quanto aos teores de fósforo solúvel, foram estatisticamente iguais (Tabela 6), com exceção da fonte FP2 na dose de 120 mg dm^{-3} . Segundo Fageria et al. (1999) as fontes de fósforo reagem diferentemente em função das características do solo, como: acidez, teor de alumínio trocável, nível de fósforo no solo, poder tampão do solo; bem como características da planta, como: sistema radicular, CTC das raízes, exsudação de compostos ácidos ou básicos, dentre outros.

Para o teor de P disponível no solo, considerando as médias das fontes de P testadas, na presença de calcário, observa-se comportamento significativo da fonte FP1 à partir da primeira dose de fósforo aplicada (Tabela 6).

Para a interpretação da análise de solo para fósforo é utilizada uma tabela de limites de interpretação subdividida em cinco classes de teores. Os limites de classes foram estabelecidos em ensaios de calibração, realizados principalmente para culturas anuais em condições de campo e levando em conta as respostas aos elementos aplicados na adubação, expressos em termos de produção relativa (RAIJ et al. 1996) . Assim, a correspondência dos limites de classes de teores para culturas anuais são: 0-6; 7-15, 16-40, 41-80 e $> 80 \text{ mg/dm}$ para os teores muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, respectivamente.

Segundo os dados da análise de solo e os limites de interpretação das classes de teores proposta por Raij et al. (1996) observamos que na presença de calcário no solo a fonte FP1 e FP2 elevaram os teores de P de médio para alto nas doses de 40 e 80 mg/dm⁻³, respectivamente. Na ausência de calcário no solo apenas a fonte FP1 elevou o teor de P de médio para alto á partir da dose de 80 mg/dm⁻³. Destaca-se que a fonte FR na dose de 120 mg/dm⁻³ elevou o teor de médio para alto (Tabela 6).

Os resultados da Tabela 7 mostram que o aumento do pH pela aplicação do calcário, foi acompanhado da elevação da saturação por bases, encontrando coerência nas relações entre os índices analíticos. Os resultados indicam que a quantidade de corretivo aplicado foi suficiente para alcançar a saturação por bases a 70%, como era previsto, corroborando os estudos de Camargo et al. (1997) sobre as alterações de atributos químicos do horizonte superficial de um latossolo e um podzólico com a calagem concluíram que a calagem aumentou o pH, a soma de bases, a CTCe, e o teor de fósforo extraível e diminui o teor de alumínio, a CTA e não alterou a adsorção de fósforo bem como o teor de micronutrientes.

Tabela 7. Saturação por bases (V%) do solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- % -----				
Presença de calcário – NS				
0	70,5	71,5	69,8	73,3
40	76,0	79,0	71,3	74,3
80	73,0	80,3	77,3	74,8
120	72,3	80,3	74,8	74,5
CV (%) 5,1				
Ausência de calcário				
0	8,8 a	6,3 a	7,8 a	10,0 a
40	7,3 b	24,5 a	9,8 b	8,8 b
80	6,8 b	25,3 a	11,8 b	11,8 b
120	7,3 b	33,5 a	14,0 b	15,8 b
Efeito de dose	NS	L**	NS	NS
CV (%) 49,5				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01.

Observou-se incremento linear significativo ($P \leq 0,01$) da saturação por bases da fonte FP1, com o aumento das doses, na condição de ausência de calcário no solo, podendo ser explicado pela alta concentração de cálcio presente nesta fonte, sendo composta de 25 % de Ca^{2+} .

6.1.2 Teores de cálcio (Ca)

Observou que a fonte FR, cuja maior porcentagem de Ca^{2+} em sua constituição (33%) em relação às demais fontes, não apresentou incremento significativo de cálcio no solo, isso pode ser explicado através do parâmetro solubilidade desta fonte reativa que necessita maior contato com o solo para ser solubilizado, não observado neste estudo com corte realizado aos 60 dias após a semeadura. (Tabela 8).

Para a fonte FP1 observou-se aumento significativo do teor de cálcio no solo, na presença de calcário, a partir da primeira dose de fósforo aplicada, em comparação as demais fontes, isso pode ser explicado pela alta concentração deste íon em sua composição, 25% de Ca^{2+} uma vez que foram idênticas as quantidades de calcário aplicadas ao solo para todas as fontes. (Tabela 8). Portanto pode-se concluir que a fonte FP1 em relação à fonte FR apresentou maior solubilização em relação a ambas às condições de acidez do solo, comprovado pelo maior teor de cálcio expresso na análise do solo para a fonte FP1.

Segundo Ernani e Barber (1991) e Coutinho et al. (1991) os fertilizantes fosfatados diferem, principalmente quanto à composição química, solubilidade e cátion acompanhante, o que foi observado neste estudo, sendo, 24,8, 15,0, 32,6 e 13,1 as porcentagens de Ca^{2+} das fontes FP1, FP2, FR e SFT, respectivamente. Essas diferenças podem influir na taxa de solubilização dos fosfatos e nas reações de precipitação e adsorção química de P nas regiões adjacentes aos grânulos ou partículas de fosfatos, onde a intensidade é alta, com reflexos na concentração de P na solução do solo. Esses reflexos na concentração de P foram observados neste estudo através do incremento linear significativo no teor de fósforo no solo para as fontes FP1, FR e SFT, com o aumento das doses de P, como já discutido.

As fontes FP1 e FP2 alteraram os valores de Ca^{2+} do solo em relação às condições de acidez do solo (Tabela 8), e corroboram os resultados de Ernani

et al. (2001) cujo objetivo foi avaliar as alterações nas características químicas de um Latossolo Alumínico resultantes da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados sobre a superfície do solo em dois valores pH.

Para as fontes SFT e FR não ocorreu interação significativa da interação dose x fonte, em ambas as condições de acidez do solo, ou seja, o comportamento das doses de fósforo aplicadas foi semelhante nas distintas condições de acidez, em relação ao teor de cálcio.

Tabela 8. Teor de cálcio no solo cultivado com plantas de milho com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- mmol/dm ³ -----				
Presença de calcário				
0	19,8 a	20,3 a	20,0 a	22,8 a
40	24,3 b	34,5 a	24,3 b	24,8 b
80	23,3 b	43,5 a	29,5 b	24,3 b
120	24,0 b	44,0 a	28,0 b	26,0 b
Efeito de dose	NS	Q**	L**	NS
CV (%) 15,2				
Ausência de calcário				
0	2,0 a	2,0 a	2,0 a	2,5 a
40	2,0 b	14,8 a	3,3 b	2,8 b
80	2,3 b	13,3 a	4,3 ab	4,8 ab
120	2,0 b	23,3 a	7,5 b	6,5 b
Efeito de dose	NS	L**	NS	NS
CV (%) 84,7				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

6.2 Atributos das plantas de milho

6.2.1 Massa de matéria seca da parte área (MSPA)

Verificou-se que a produção de matéria seca do milho foi decrescente, na presença de calcário, para as fontes: SFT > FP1 > FP2 > FR (Tabela 9).

A correção da acidez do solo é muito importante ao adequado desenvolvimento do milho, embora existam materiais genéticos mais tolerantes às condições de acidez (CANTARELLA, 1993). São vários os trabalhos que demonstram aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistemas de preparo convencional (GONZALES-ERICO et al., 1979; CAMARGO et al., 1982; RAIJ et al., 1983; ERNANI et al., 1998). Quanto ao ganho na produção de matéria seca e de grãos, a calagem é uma prática destacada nos trabalhos de Forestieri e De-Polli (1990) e Nwachuku e Loganathan (1991).

Tabela 9. Massa de matéria seca da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- g vaso ⁻¹ -----				
Presença de calcário				
0	2,1 a	2,0 a	2,1 a	2,3 a
40	63,0 a	10,7 b	10,2 b	2,7 b
80	78,2 a	32,7 b	12,8 c	5,1 c
120	91,8 a	44,0 b	17,4 c	3,9 d
Efeito de dose	Q**	L**	L**	NS
CV (%)	23,7			
Ausência de calcário - NS				
0	1,2	1,3	1,0	1,0
40	36,9	15,4	11,8	13,4
80	39,9	36,0	23,5	30,7
120	44,7	43,1	33,8	38,6
Efeito de dose	Q**	L**	L**	L**
CV (%)	36,2			

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

A fonte SFT apresentou os maiores índices de matéria seca com o aumento das doses, em ambas as condições de acidez do solo, mesmo apresentando os menores teores de fósforo solúvel (Tabela 9) em relação às demais fontes, corroborando os dados obtidos por Harger et al. (2007).

Verificou-se que a maior dose de fósforo apresentou o maior rendimento na produção de matéria seca, na presença de calcário, sendo: 91,8, 44,0 e 17,4 (g vaso⁻¹) para as fontes SFT, FP1 e FP2, respectivamente. Ao avaliar a alteração na disponibilidade de fósforo, através das aplicações de fosfato Corrêa (1991) verificou

resposta acentuada do capim Marandú em um Latossolo Vermelho-Amarelo álico, quanto à produção de massa seca, com o aumento das doses de fósforo, até o equivalente a 140 mg dm⁻³. Rossi (1995) também observou respostas na produção de massa seca desse mesmo capim até a dose de 300 mg dm⁻³ de superfosfato triplo.

Os dados de massa de matéria seca da parte aérea do milho se ajustaram a uma regressão quadrática para o superfosfato triplo e linear para o FP1 e FP2, na condição de presença de calcário, cujo coeficiente de determinação explica o efeito das doses de P aplicadas (97, 97 e 95%, respectivamente) (Figura 4a). Na ausência de calcário não houve diferença estatística para os dados de matéria seca da parte aérea do milho, embora a fonte SFT tenha se ajustado a uma regressão quadrática e as demais fontes a regressões lineares (Figura 4b).

Os fosfatos reativos parecem promissores para uso direto na adubação em diversas combinações de culturas e sistemas de manejo do solo (KAMINSKI; PERUZZO, 1997; HOROWITZ; MEURER, 2003; SOUSA; LOBATO, 2003). Contudo, não é simples a previsão das respostas à adubação. Ao considerar a produção acumulada de vários cultivos após a aplicação, verifica-se que o desempenho de alguns fosfatos naturais pode equiparar-se ao das fontes mais solúveis. Isso se explica pelo fato de o P prontamente liberado dos fertilizantes solúveis passar para formas menos disponíveis, enquanto os fosfatos naturais vão sendo solubilizados no decorrer do tempo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

É reportado na literatura que fontes fosfatadas de levada 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 fonte de P menos solúveis pode ser mais eficiente e econômica em relação às fontes de elevada solubilidade para culturas de ciclo mais extenso, como as perenes.

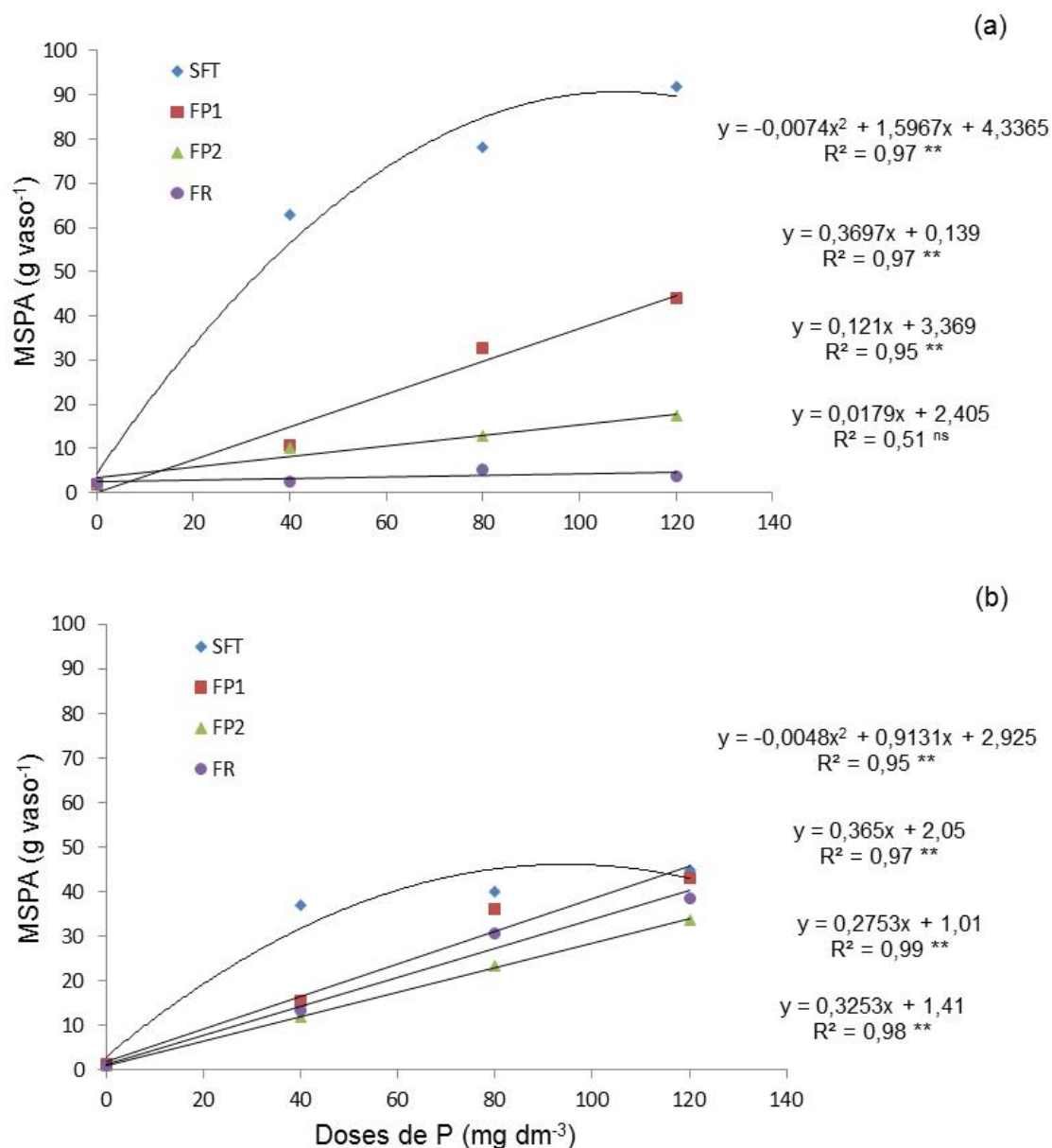


Figura 4. Efeito das fontes e doses de fósforo na produção de matéria seca de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário.

6.2.2 Teor e acúmulo de fósforo na parte aérea da planta

Na matéria seca da parte aérea, o teor de P não diferiu estatisticamente entre as fontes testadas e não houve efeito da interação entre fontes e doses de P na presença de calcário. A aplicação de P incrementou o teor do elemento na

parte aérea da forma quadrática para as fontes FP1, FP2 e FR, atingindo maior valor na dose 80 mg dm⁻³ (Figura 5a).

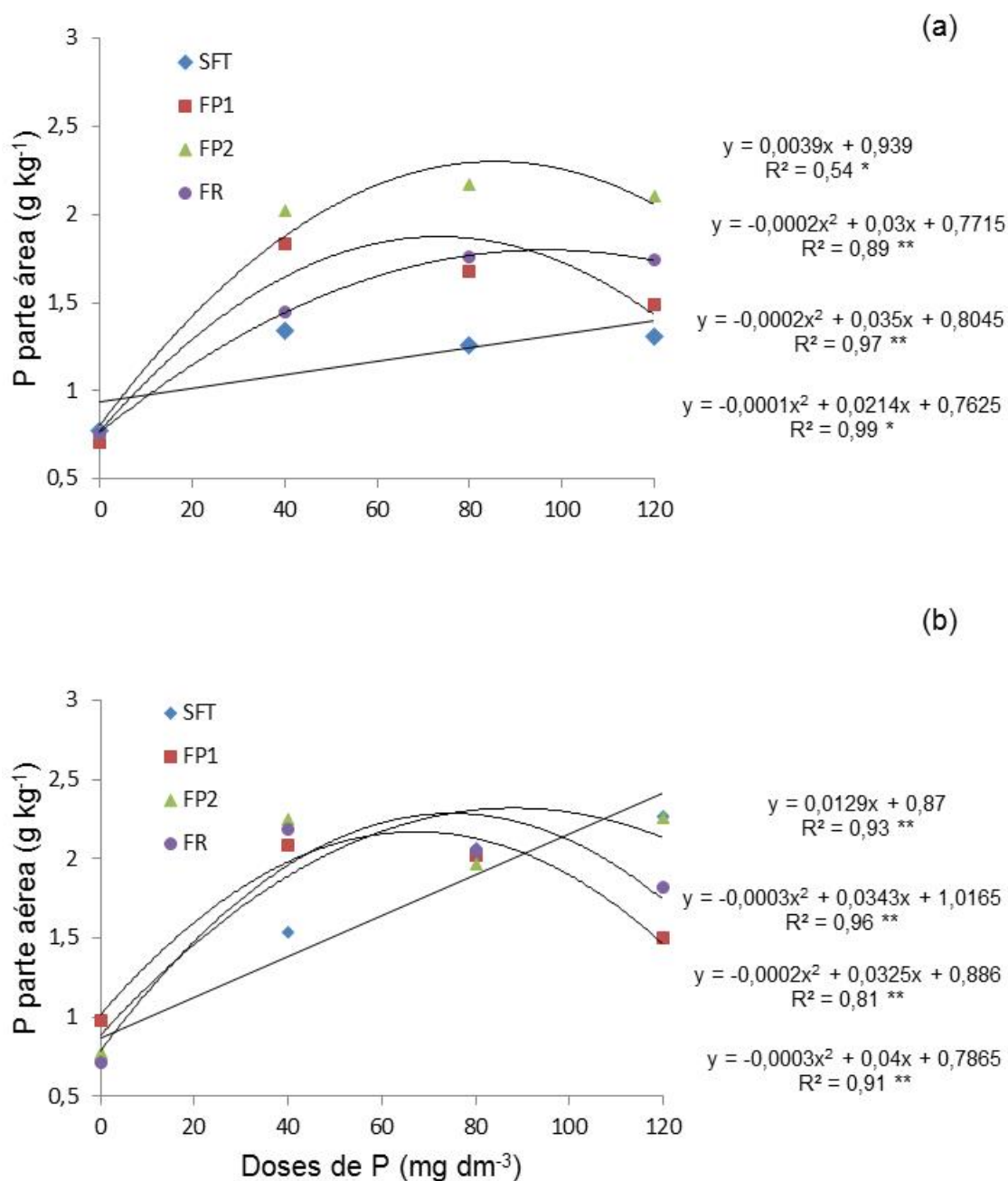


Figura 5. Teor de fósforo na parte aérea de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário no solo, nas doses de fósforo aplicadas.

Na ausência de calcário no solo se observou diferença estatística, a partir da primeira dose de fósforo, entre as fontes testadas (Tabela 10). Os teores de fósforo na planta se ajustaram a uma regressão linear para o SFT e quadráticas para as fontes FP1, FP2 e FR (Figura 5b), mesmo apresentando, nesta condição, menores teores de fósforo solúvel no solo, como já discutido.

Tabela 10. Teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- g kg ⁻¹ -----				
Presença de calcário – NS				
0	0,8	0,7	0,8	0,8
40	1,3	1,8	2,0	1,5
80	1,3	1,7	2,2	1,8
120	1,3	1,5	2,1	1,7
Efeito de dose	L*	Q**	Q**	Q*
CV (%) 21,2				
Ausência de calcário				
0	0,7 a	1,0 a	0,8 a	0,7 a
40	1,5 b	2,1 ab	2,2 a	2,2 a
80	2,1 a	2,0 a	2,0 a	2,1 a
120	2,3 a	1,5 b	2,3 a	1,8 ab
Efeito de dose	L**	Q**	Q**	Q**
CV (%) 18,8				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

Cabe salientar, ainda, que houve variação do teor de fósforo da parte aérea com o aumento das doses de P, especialmente pela aplicação da adubação em relação as maiores doses de P, que atingiu o máximo de 1,5 g kg⁻¹ para a fonte FP1. As menores variações do teor de P da parte aérea de acordo com as doses, para as fontes FP1, FP2 e FR podem ter recebido contribuição do efeito concentração e diluição, provocado pelo menor e maior crescimento das plantas.

Novais et al. (1985) observaram que o P se acumula de maneira desuniforme na folha do milho, em consequência de sua disponibilidade limitada a apenas uma parte do sistema radicular, como ocorre na aplicação localizada. Todavia, quando fornecido em área total das raízes planta, como realizado neste estudo, a distância de P interna é uniformemente favorecida. Essa compartimentalização de P na planta, em

resposta ao contato do elemento com apenas parte do sistema radicular, indica haver limitação na redistribuição interna de P na planta (ALVES et al., 1999) e pode ser explicada pelo tipo de vascularização entre folhas e raízes do milho (STRYKER et al. 1974).

O acúmulo de P na parte aérea das plantas não diferiu estatisticamente entre as fontes testadas e não houve efeito da interação entre fontes e doses de P na ausência de calcário. A aplicação de P incrementou o acúmulo de P de forma quadrática para as fontes SFT e FP1, atingindo maior valor entre as doses de 80 e 120 mg dm⁻³, já para as fonte FP2 e FR o incremento foi de forma linear. (Figura 6a).

Na presença de calcário no solo se observou diferença estatística para o acúmulo de P, a partir da primeira dose se P, entre as fontes testadas. (Tabela 10). Os acúmulos de fósforo na planta se ajustaram a uma regressão quadrática para o SFT e linear para as fontes FP1, FP2 (Figura 6b).

Ono et al. (2009) avaliaram os efeitos de diferentes doses de P provenientes de fosfato natural de Arad e do superfosfato triplo sobre o cultivo sucessivo da soja e do milho em Latossolo Vermelho Distroférrico, em casa-de-vegetação, e observaram que os teores de P nas folhas foram superiores para o SFT na maior dose (560 mg dm⁻³), em relação ao fosfato natural de Arad. O mesmo se observou neste estudo para o acúmulo de P, que foi superior para o SFT na dose de 120 mg dm⁻³, em comparação ao acúmulo de P das fontes, FP1 e FP2, respectivamente (Tabela 11).

Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os coeficientes de correlação entre o P extraído por resina e o P acumulado na parte aérea das plantas de milho, na presença e ausência de calcário no solo, respectivamente. O coeficiente de correlação Pearson (r) varia de -1 a 1, quanto mais perto de 1 (independente do sinal) maior será o grau de dependência estatística linear entre as variáveis e quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação. Segundo Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados médios, e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancey e Reidy (2006) apontam para uma classificação diferente: r = 0,10 até 0,30 correlação fraca; r = 0,40 até 0,6 correlação moderada e r = 0,70 até 1 correlação forte.

Segundo a classificação de Dancey e Reidy (2006) observa-se forte correlação entre as variáveis P resina e P acumulado, em ambas as condições de acidez para a fonte SFT (Figuras 7a e 8a), concluindo-se que o método de extração por resina de trocadora de ânions foi adequada para estimar a quantidade de P disponibilizada

por esta fonte. Observou-se moderada correlação entre as variáveis P resina e P acumulado, em ambas as condições de acidez para a fonte FP2 (Figuras 7c e 8c).

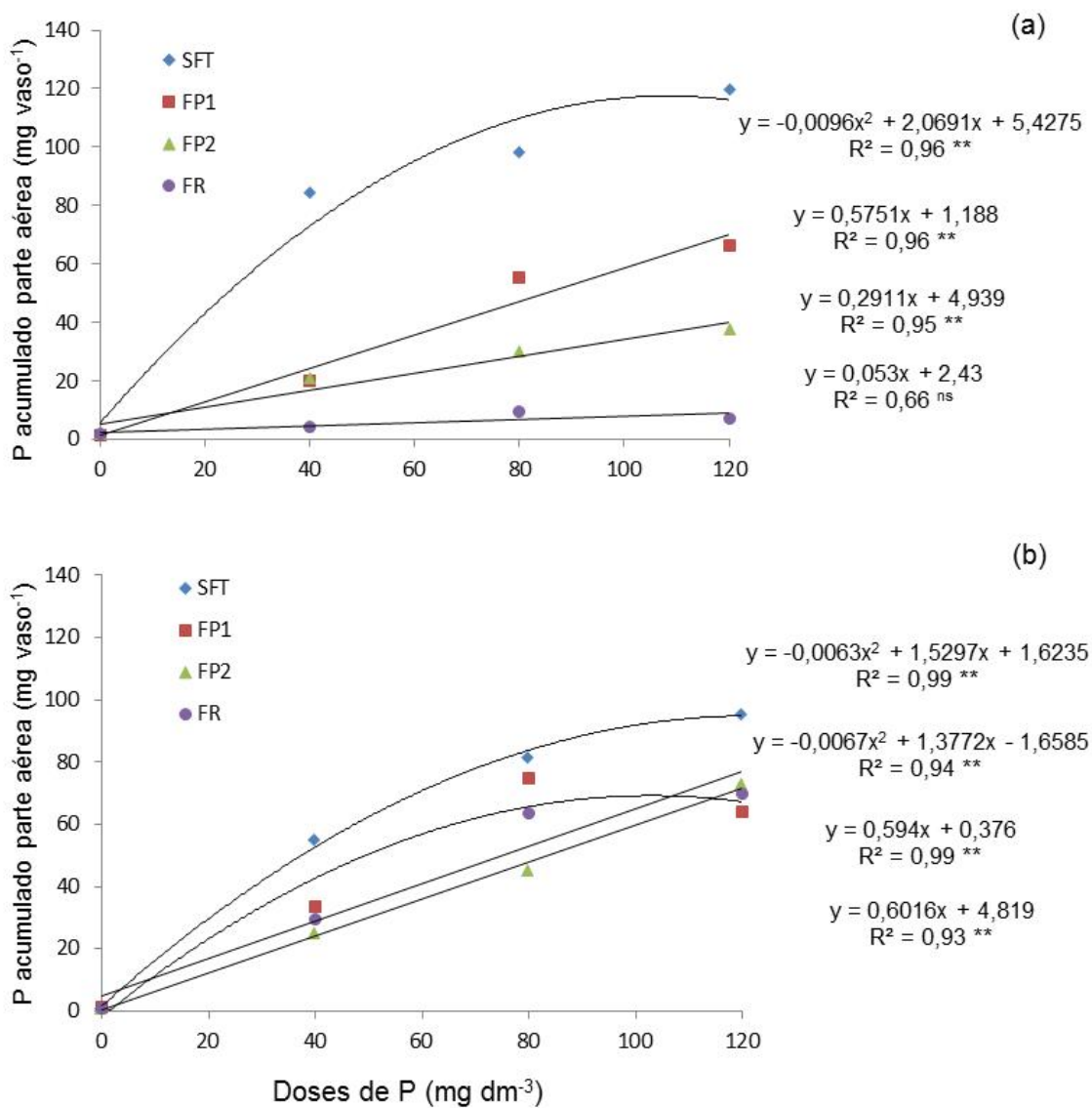


Figura 6. Fósforo acumulado na parte aérea de plantas de milho, (a) presença de calcário e (b) ausência de calcário.

Tabela 11. Acúmulo de fósforo da parte aérea de plantas de milho, com a aplicação das fontes de fósforo, nas condições de presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Presença de calcário				
0	1,6 a	1,4 a	1,7 a	1,7 a
40	84,3 a	19,8 b	20,7 b	4,2 b
80	98,4 a	55,2 b	29,9 bc	9,5 c
120	120,0 a	66,3 b	37,4 c	7,0 d
Efeito de dose	Q**	L**	L**	NS
CV (%) 38,7				
Ausência de calcário - NS				
0	0,9	1,4	0,7	0,8
40	55,0	33,5	24,9	29,6
80	81,6	74,9	45,3	63,7
120	95,6	64,1	73,2	69,6
Efeito de dose	Q**	Q**	L**	L**
CV (%) 29,8				

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

Para as fontes FP1 e FR observou-se diferença de correlação em relação à acidez do solo. A fonte FP1 apresentou forte correlação entre P resina e P acumulado na presença de calcário e moderada correlação na ausência de calcário (Figuras 7b e 8b, respectivamente). A fonte FR apresentou moderada correlação entre P resina e P acumulado na presença de calcário no solo e forte correlação na ausência de calcário (Figuras 7d e 8d, respectivamente).

A extração de P com resina de troca iônica têm sido apresentada como uma alternativa capaz de reproduzir, em laboratório, o processo de absorção de P pelas plantas, porque retira apenas a fração lábil. De acordo com Silva e Braga (1992) o P extraído pela resina parece ser menos influenciado, em relação aos outros métodos, pelo poder tampão do solo e pelo tempo decorrido após a incubação do solo com fertilizantes.

Observaram-se correlações moderadas e fortes entre P resina e P acumulado entre as fontes fosfatadas testadas, concluindo-se que o método da resina de troca iônica foi adequado para estimar a disponibilidade de P gerada pelos fertilizantes aplicados neste estudo.

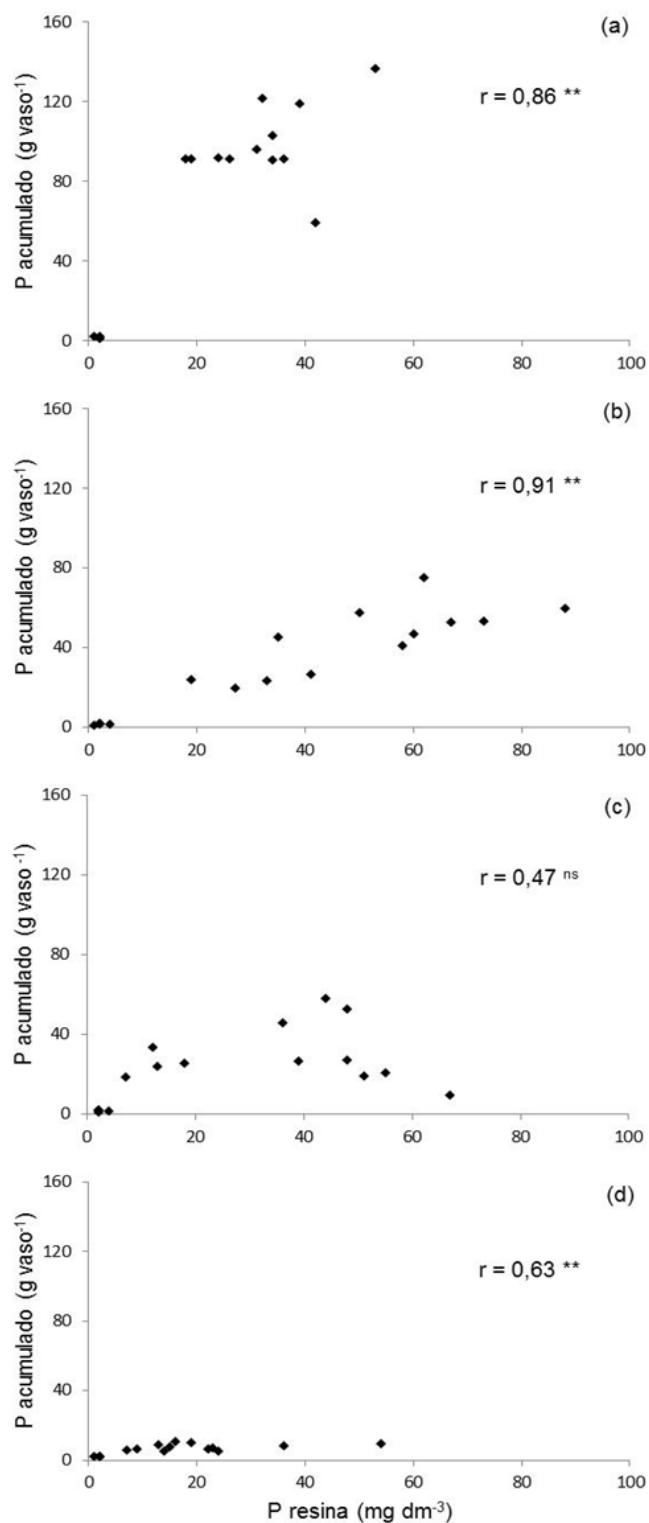


Figura 7. Correlação entre fósforo acumulado e teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho na presença de calcário, para as fontes (a) SFT, (b) FP1, (c) FP2 e (d) FR.

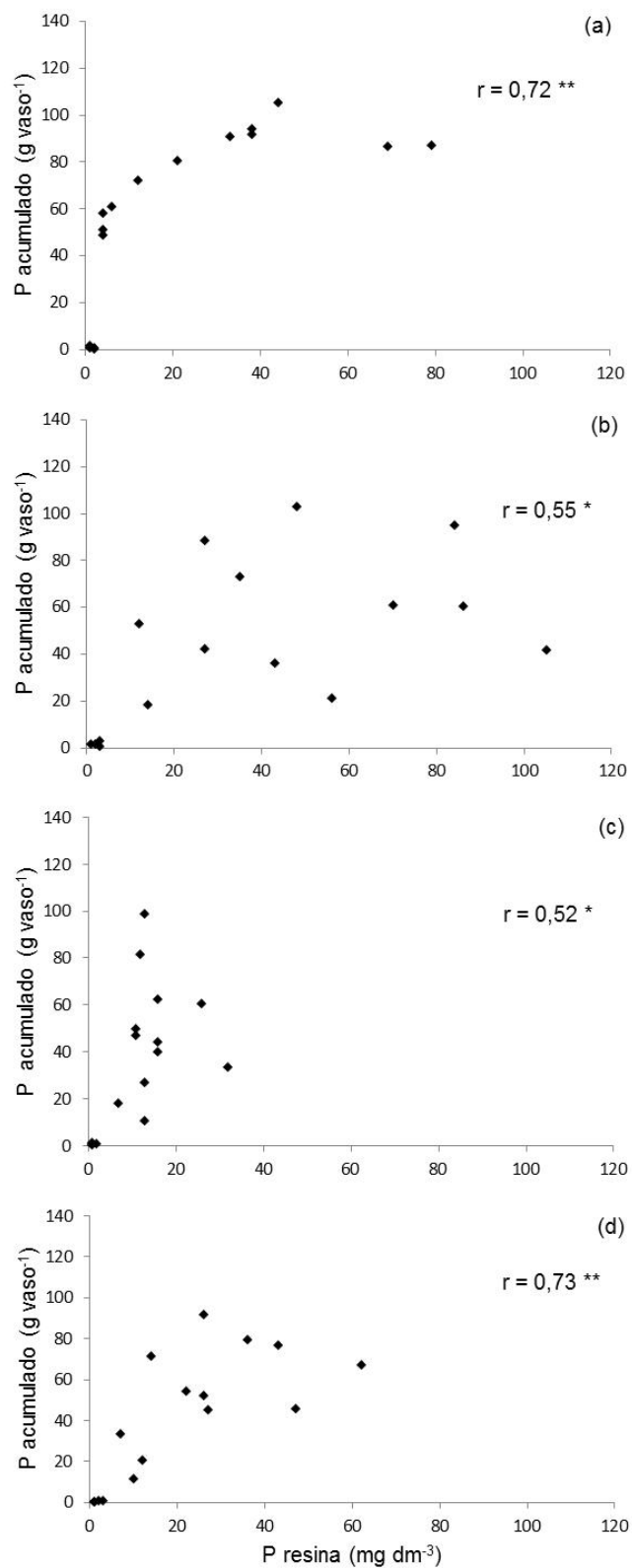


Figura 8. Correlação entre fósforo acumulado e teor de fósforo da parte aérea de plantas de milho na presença de calcário, para as fontes (a) SFT, (b) FP1, (c) FP2 e (d) FR.

6.2.3 Altura e Diâmetro de plantas de milho

Os valores médios de altura de plantas foram diretamente influenciados pela aplicação de calcário no solo (Tabela 12). Resultados semelhantes foram obtidos por Forestieri e De-Polli (1990), pois sabe-se que o Ca e o Mg, presente no corretivo de acidez, têm papel importante no crescimento de tecidos da planta (TAIZ; ZEIGER, 1991; MENGEL; KIRKBY, 1987) e pelas doses de fósforo corroborando os estudos de Tiritan et al. (2010) que verificaram que a altura de plantas do milho apresentou aumento em função das doses de fósforo, independente do adubo fosfatado utilizado. Lucena et al. (2000), testando doses de fósforo (0 kg ha⁻¹, 60 kg ha⁻¹, 120 kg ha⁻¹, 180 kg ha⁻¹ e 240 kg ha⁻¹ de P₂O₅), verificaram aumento da altura de plantas de milho, até a dose de 177 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Observaram-se interações significativas entre fontes e doses apenas na presença de calcário no solo. Verificou-se que em solo corrigido a altura de planta de milho foi decrescente para as fontes: SFT > FP1 > FP2 > FR e houve diferença estatística a partir da primeira dose de fósforo, entre as fontes testadas. (Tabela 12).

Os valores de alturas de plantas se ajustaram a regressão quadrática para o SFT e lineares para as fontes FP1, FP2. As maiores alturas foram observadas em relação à maior dose aplicada, com exceção da fonte FR. Destaca-se que a fonte FP1 foi a fonte fosfatada que, em comparação ao SFT, apresentou maiores médias de altura em relação as demais (Tabela 12).

Dentre os componentes morfológicos, a altura de plantas não tem, geralmente, correlação com a produtividade; cultivares modernas, com alto potencial produtivo, são, em sua maioria, de porte baixo, mas também se podem encontrar materiais de porte alto com desempenhos semelhantes aos baixos (CRUZ et al., 2008).

Em relação ao diâmetro do colmo das plantas de milho observou-se que as fontes de fósforo testadas diferiram estatisticamente com o aumento das doses de P, na presença de calcário no solo, no entanto, na ausência de calcário as fontes não diferiram estatisticamente (Tabela 13).

Tabela 12. Altura de plantas de milho nas condições de aplicação das fontes de fósforo, na presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- cm -----				
Presença de calcário				
0	19,12 a	29,62 a	13,82 a	38,56 a
40	81,25 a	42,37 ab	34,56 b	17,25 b
80	82,00 a	58,37 ab	38,62 b	30,62 b
120	95,62 a	82,12 ab	50,00 bc	21,50 c
Efeito de dose	Q*	L**	L*	NS
CV (%)	46,2			
Ausência de calcário				
0	9,8	11,6	9,5	9,4
40	62,9	40,9	36,6	39,6
80	59,3	57,3	46,1	54,9
120	65,1	64,3	58,3	65,0
Efeito de dose	Q**	L**	L**	L**
CV (%)	24,9			

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

Tabela 13. Diâmetro do colmo de plantas de milho nas condições de aplicação das fontes de fósforo, na presença e ausência de calcário.

Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- mm -----				
Presença de calcário				
0	3,84 a	4,02 a	4,48 a	4,43 a
40	14,48 a	8,01 b	8,53 b	5,57 b
80	17,04 a	11,86 b	8,62 c	6,62 c
120	16,48 a	12,21 b	10,18 b	6,70 c
Efeito de dose	Q**	Q*	L**	L*
CV (%)	18,3			
Ausência de calcário				
0	4,08 a	3,67 a	3,56 a	3,49 a
40	11,15 a	10,57 a	10,13 a	10,11 a
80	13,07 a	12,59 a	11,68 a	12,67 a
120	13,65 a	13,07 a	12,28 a	13,47 a
Efeito de dose	Q**	Q**	Q**	Q**
CV (%)	16,3			

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: $P < 0,05$; ** $P < 0,01$.

Gutierrez et al. (2008), observaram que a fertilização fosfatada proporcionou efeito positivo no diâmetro de caule e altura de plantas da parte aérea do milho corroborando os resultados encontrados no presente estudo, onde o aumento das doses de fósforo proporcionou maior diâmetro do colmo das plantas de milho.

Normalmente, o diâmetro do colmo apresenta correlação com a produtividade por se tratar de um órgão de reserva da planta (CRUZ et al., 2008). Neste estudo se observou que as médias do diâmetro do colmo de plantas de milho foram maiores na condição de solo corrigido, na qual se obteve maiores médias de matéria seca da parte aérea. O colmo atua como estrutura de armazenamento de sólidos solúveis que serão utilizados, posteriormente, na formação dos grãos (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2000).

6.3 Índices de Eficiência Agronômica

O índice de eficiência agronômica foi calculado neste estudo com base na produção de matéria seca e fósforo acumulado da parte aérea de plantas de milho (Tabela 14). Observa-se que as fontes e as doses de fósforo influenciaram o índice de eficiência agronômica nas duas condições de acidez de solo estudadas.

Na presença de calcário no solo observa-se que os índices de eficiência agronômica de matéria seca foram superiores na maior dose de P, obteve-se eficiências de 46,4 e 17,0 para as fontes precipitadas (FP1, FP2). No entanto, observa-se que os índices de eficiência agronômica em relação ao fósforo acumulado foram superiores nas duas maiores doses aplicadas das fontes precipitadas. O FR, tanto para matéria seca como para P acumulado, apresentou valores de eficiência agronômica muito reduzida na presença de calcário no solo.

Na ausência de calcário no solo observa-se que os índices de eficiência agronômica de matéria seca foram também mais expressivos na maior dose testada. No entanto, deve-se considerar que estes resultados foram alcançados em função da redução da produção de matéria seca com SFT na ausência de calcário, ou seja, em condição de acidez do solo inadequada a este fertilizante, favorecendo os mecanismos de insolubilização de P e reduzindo o crescimento das plantas.

Tabela 14. Índices de Eficiência Agronômica (IEA) das fontes de fósforo, com base na produção de matéria seca e fósforo acumulado da parte aérea de plantas de milho, nas condições de presença e ausência de calcário.

Massa de matéria seca				
Doses de P	Fontes			
	SFT	FP1	FP2	FR
----- % -----				
Presença de calcário				
40	100	14,2	12,9	0,6
80	100	40,4	14,4	3,8
120	100	46,4	17,0	1,8
Ausência de calcário				
40	100	40,0	28,6	40,1
80	100	91,4	59,6	78,6
120	100	106,7	76,7	95,3
Fósforo Acumulado				
Presença de calcário				
40	100	23,6	21,8	3,4
80	100	54,9	29,8	8,1
120	100	53,6	29,8	4,4
Ausência de calcário				
40	100	58,3	43,9	54,4
80	100	90,2	55,3	77,8
120	100	65,6	76,5	72,7

SFT: Super Fosfato Triplo; FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FR: Fosfato Reativo.

Destaca-se que dentre as fontes fosfatadas estudadas a fonte FP1 obteve as melhores eficiências agronômicas em relação à matéria seca e fósforo acumulado, nas duas condições de acidez de solo estudadas. A fonte FR apresentou índices superiores de eficiência agronômica de 95,3 e 72,7 % para matéria seca e P acumulado, respectivamente, na ausência de calcário no solo (Figuras 9 e 10).

Blanco et al. (1965), trabalhando com o fosfato de Araxá e outros fosfatos, em três condições de pH verificaram que na faixa de pH 4,7 - 5,0 houve melhor aproveitamento desses fosfatos. Alguns estudos tem demonstrado a maior eficiência das rochas fosfatadas em condições de acentuada acidez, que pode ser atribuído à constituição dos fosfatos naturais, que contém a fluorapatita que se decompõem em meio ácido para formar fosfato monocálcico e outros compostos solúveis. Korndörfer et al. (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 efeito residual.

Segundo Guedes et al. (2009), os fosfatos menos reativos, em geral, apresentam menor eficiência que os fosfatos solúveis em curto prazo; porém, a longo prazo, seu efeito residual é geralmente maior.

Ao testar diferentes fontes de P no estabelecimento de pastagens de *P. maximum* consorciadas com sorgo, Benício et al. (2011), verificaram que ao final do primeiro ano de implantação os tratamentos que receberam a fonte menos solúvel foram superiores, os autores atribuíram os resultados ao maior efeito residual da fonte.

Em trabalho realizado por Silverol e Machado Filho (2007) estudando a utilização de pó de granito para a fertilização de solos, observaram que os tratamentos que tinham quantidades significativas de pó de rocha, as plantas de milho desenvolveram adequadamente em comparação com a testemunha. Embora esse resultado seja inferior ao tratamento químico, altamente solúvel, evidencia a importância, em longo prazo, na melhoria da fertilidade de solos que apresentam sinais de degradação, especialmente das pastagens.

Os fosfatos de origem sedimentar, como o de Gafsa (proveniente da Tunísia), possuem alta reatividade (SYERS et al., 1986). No Brasil, esse fosfato é comercializado como fonte alternativa, de custo mais baixo, e tem apresentado maior efeito residual no solo, quando comparado aos superfosfatos (SOUSA et al., 2008).

A fonte padrão SFT, referência deste estudo foi a que apresentou as máximas eficiências agronômicas, corroborando o trabalho de Fontoura et al. (2010) que estudando a aplicação de superfosfato triplo e fosfato natural em sistema de plantio direto verificaram que o ST é mais eficiente do que os fosfatos naturais reativos em solos tanto no efeito imediato quanto na fase residual. A superioridade inicial do fosfato solúvel (SFT) em relação aos FNR é relatada por Oliveira Junior et al. (2008) e Scholefield et al. (1999).

Prochnow et al. (2004) verificaram que a EAR do FR aplicado conjuntamente com o SSP foi estatisticamente equivalente a utilização isolada do SSP, quando a mistura foi granulada, ao passo que, a utilização isolada do FR apresentou EAR de 1 e 30%, respectivamente, para o cultivo do trigo e do azevém. A partir das equações de regressão, os autores estimaram a eficiência relativa do FR quando na presença do SSP

(ERFR) verificando que no caso da variável matéria seca, a ERFR foi de 82 e 95%, respectivamente para o azevém e para o trigo.

Os adubos fosfatados acidulados apresentam solubilidades relativamente elevadas em água, como é o caso neste estudo da fonte SFT, razão por que têm alta eficiência agrônômica quando comparados aos fosfatos naturais (PROCHNOW et al., 2004). O emprego de rochas fosfáticas necessita de pesquisas que assegurem a sua eficiência como fontes alternativas de fósforo, podendo substituir os superfosfatos em culturas anuais (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

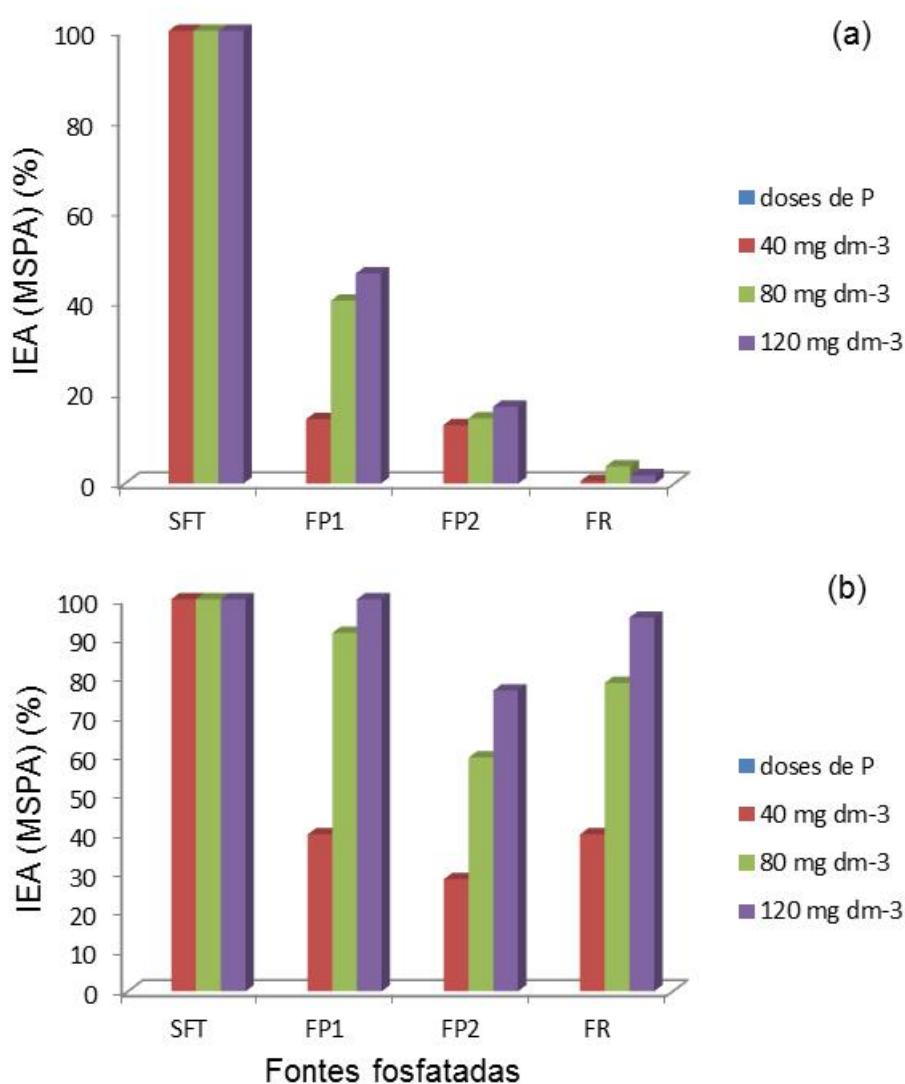


Figura 9. Índice de Eficiência Agrônômica em relação à matéria seca da parte aérea de plantas de milho, (a) na presença de calcário no solo e (b) na ausência de calcário no solo.

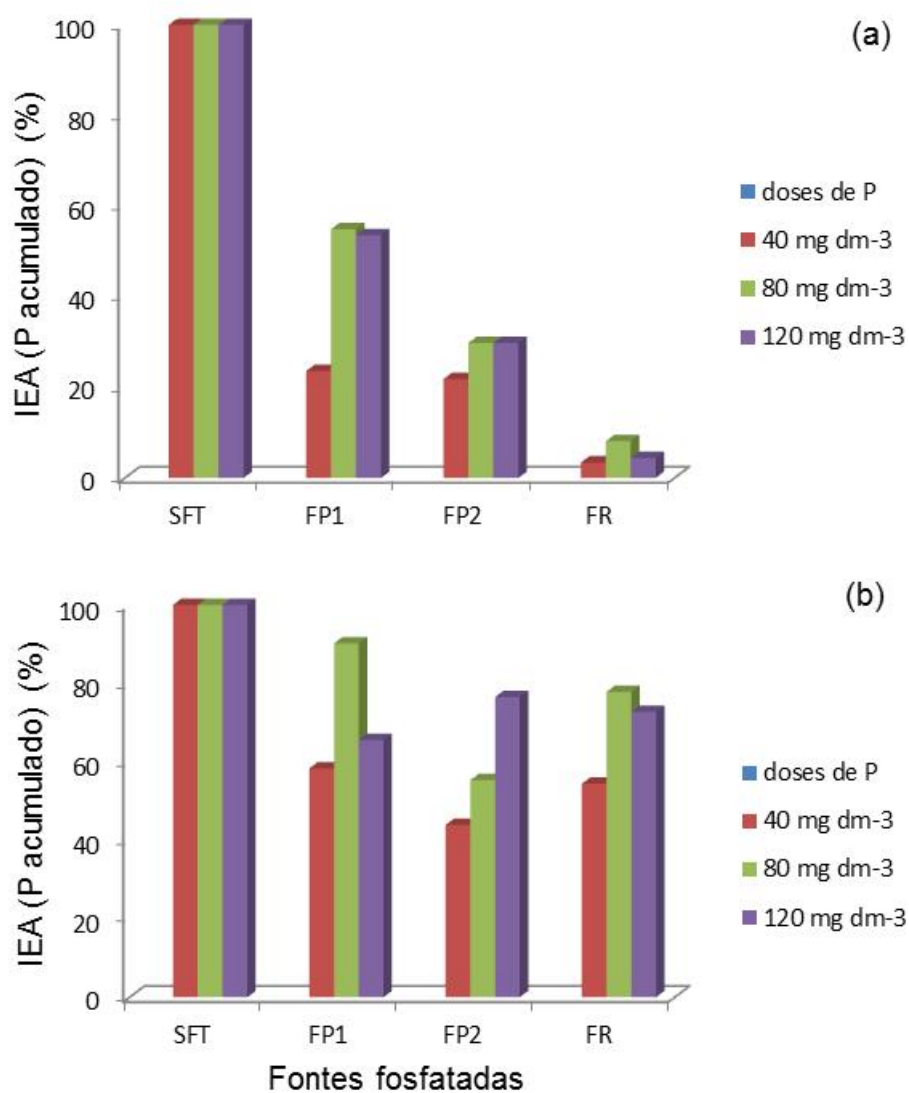


Figura 10. Índice de Eficiência Agrônômica em relação ao P acumulado da parte aérea de plantas de milho, (a) na presença de calcário no solo e (b) na ausência de calcário no solo.

7. CONCLUSÕES

1. As fontes FP1, FP2 e FR apresentaram maior eficiência agronômica na ausência de calcário no solo.
2. Dentre os rejeitos testados, o FP1 apresentou os maiores índices de eficiência agronômica.
3. Ambos os rejeitos estudados podem ser utilizados como fontes alternativas de fósforo em solos ácidos.

8. REFERÊNCIAS

ALVES, V. M. C. et al. Acúmulo de nitrogênio e de fósforo em plantas de milho afetadas pelo suprimento parcial de fósforo nas raízes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 299-305, 1999.

ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C.A. et al. eds. **Fertilidade dos solo e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre, Genesis, 2004. v.1. p.117-138.

ARAI, Y.; SPARKS, D.L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil minerals: A multiscale approach. **Advances in Agronomy**, San Diego, US, v. 94, n. 1, p. 135-179, 2007.

ARAÚJO, R. V. de et al., (2004): Lixiviação clorídrica de concentrado fosfático: estudo de caso. X ENTEMME, vol. I, p. 533-540.

BAESSO, M. M. et al. Determinação do “status” nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.520-528, 2007.

BARBOSA FILHO, M.P. Utilização de fosfatos naturais em solos de cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 28, p. 1- 4, dez. 1984

BARNES, J. S.; E. J.KAMPRATH. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soil. **Technical Bulletin**, Agricultural Station. North Carolina, n. 229, 1975. 23 p.

BASTOS, A.L. et al. Resposta do milho a doses de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.485-491, 2010.

BATIONO, A. et al. 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. et al. 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.

BENÍCIO, L. P. F. et al. Produção de Panicum maximum consorciado com sorgo sob diferentes fontes de fósforo. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v.5, n.2, p.55-60, 2011.

BHATTI, T. M.; YAWAR, W. Bacterial solubilization of phosphorus from phosphate rock containing sulfur-mud. **Hydrometallurgy**, Amsterdam, v. 103, n. 1-4, p. 54-59, June 2010.

BIASIOLI, G. M. **Influência do pH e da força iônica na liberação de fósforo de compostos do tipo Fe-K-P presentes em superfosfatos**. 2003. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

BLANCO, H.G.; VENTURINI, W.R.; GARGANTINI, H. Comportamento de fertilizantes fosfatados em diferentes condições de acidez do solo, para trigo, em estudo de efeito residual para a soja. **Bragantia**, Campinas, v.24, p.261-290, 1965.

BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J. Dissolution of phosphate rocks in soil. 2. Effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 24, n. 3, p. 125-134, 1990.

BOLAND et al. Influence of manufacturing variables on characteristics and the agronomic value of partially acidulated phosphate fertilizer. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 26, p. 119-138, 1990.

BRAGA, N.R. et al. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, p. 36-39, 1980.

BRAGA, N. R. et al. Eficiência agronômica de nove fosfatos em quatro cultivos de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 315-19, 1991.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1983. 104 p.

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 propriedades químicas em um latossolo vermelho-escuro e eficiência agronômica. **Bragantia**, Campinas, v. 56, p. 169-179, 1997.

BÜLL, L.T. et al. Relação entre fósforo extraído por resina e resposta da cultura do alho vernalizado à adubação fosfatada em cinco solos com e sem adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, p. 459-470, 1998.

CAIRES, E.F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p.791-798, 2005.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p. 575-579, 1997.

CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; DECHEM, A.R. Efeitos do pH e da incubação na extração de manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, p. 83-88, 1982.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.147-196.

CHIEN, S. H. Dissolution of phosphate rock in a flooded acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Baltimore, v. 41, p. 1106-109. 1977.

CHIEN, S.H. et al. Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn. **Soil Science of American Journal**, Madison, v. 51, p. 1656-1658, 1987.

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

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Agronomic evaluation of modified phosphate rock products. IFDC's experience. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.41, p.197-209, 1995a.

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, 1995b.

COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba, **Anais...** Piracicaba: POTAFÓS/ANDA, 2003. 31p. CD-ROM.

COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Science**. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988, 596p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira/grãos: quarto levantamento**. Brasília, 2010. p. 28-30.

CORRÊA, L. A. **Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de B. decumbens Stapf, B. brizantha (Hochst.) Stapf. cv. Marandu e P. maximum Jacq., em latossolo vermelho-amarelo, álico**. 1991. 83 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

COSTA, S. E. V. A. et al. Crescimento e nutrição da braquiária em função de fontes de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1419-1427, set./out., 2008.

COUTINHO, E.L.M. et al. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p 1393-1399, 1991.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, p. 197-214, 1995.

CRUZ, S.C.S. et al. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.1, p.62-68, 2008.

CUNHA, A.R. et al. Classificação climática para o município de Botucatu-SP, segundo Koppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p.487-491.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, p.83-117, 1977.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem Matemática para a Psicologia**: usando SPSS para Windows. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 608p.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. Elementos Requeridos à Nutrição de Plantas. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do Solo**. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 91 - 132.

DEFILIPPE, G. Panorama da rocha fosfática e ácido fosfórico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5., 1990, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo, SP: IBRAFOS, 1990. p. 5-9.

DIAS, E.G.; LAJOLO, R.D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. In: F. R. C., LUZ, A. B., CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2009, cap. 6, p. 105-124.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 306 p.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, RJ, v. 26, p. 1309-1314, 1991.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; OLIVEIRA, L.C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 275-280, 1998.

ERNANI, P.R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.939-946, 2001.

FAGERIA, N.K. Adubação e calagem. In: VIERIA, N.R.A.; SANTOS, A.B.; SANT'ANA, E.P. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA-CNPAP, 1999. p. 329-353.

FAGUNDES, A. B., MENEZES W. C.; KALCKMANN, R. E. Adubação e calagem terras do Cerrado. In REUNIÃO BRASILEIRA DO CERRADO, 2. , 1953, Campinas, SP. **Anais...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1953. p. 295-304.

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.

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.

FONTOURA, S. M. V. et al. Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.1907-1914, 2010.

FORESTIERI, E.F.; DE-POLLI, H. Calagem, enxofre e micronutrientes no crescimento do milho e da mucuna preta num podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, p.167-172, 1990.

FREIRE, F. M.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B. Manejo da fertilidade do solo em pastagens. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 226, p. 44 -53, 2005.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA, 2001. 252 p.

GHOSAL, P.K. et al. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics on an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tóquio, v. 86, p. 2302-2310, 2006.

GIKES, R.J.; LIM-NUNEZ, R. Poorly soluble phosphates in Australian super-phosphate – their nature and availability to plants. **Australian Journal of Soil Research**, Armidale, v. 18. n. 1, p. 85-95, 1980.

GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 3, p. 311-318, 1980.

GOEDERT, W. J.; E. LOBATO. Eficiência agronômica de fosfatos em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 15, p. 311-18,1983.

GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Avaliação agronômica de fosfatos naturais em solo de Cerrado. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 97-102, 1984.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPOSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILIERA, 1984, Brasília. **Anais...** Brasília, DF: EMBRAPA, 1984. p. 255-290.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

GOEDERT, W.J.; LOPES, A.S. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO, 1987, São Paulo, **Anais...** São Paulo, SP: IBRAFOS, 1987, p. 24-49.

GOEDERT, REIN, T.A.; SOUZA, D.M.G. Eficiência agronômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 4, p. 521-530, 1990.

GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUZA, D.M.G. Eficiência agronômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 4, p. 521-530, 1990.

GONZALEZ-ERICO, E. et al. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brazil. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 43, p. 1155-1158, 1979.

GRANT, C.A. et al. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 95, 2001.

GUEDES, E.M.S.; FERNANDES, A.R.; LIMA, E.V.; GAMA, M.A.P.; SILVA, A.L.P. Fosfato natural de Arad e calagem e o crescimento de *Brachiaria brizanta* em Latossolo Amarelo sob pastagem degradada na Amazônia. **Revista Ciência Agrária**, Belém, n. 52, p. 117-129, 2009.

HAMMOND, L.L. **Research on direct application of phosphate rock in the Agro-Economic Division**. IFDC, Florence, Alabama, 5p. (Memorandum), 1977.

HAMMOND, L.L.; CHEIN, S.H.; POLO, J.R. Phosphorus availability from partial acidulation of phosphate rock. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 1, p. 37-49, 1980.

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

HARGER, N. et al. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 39- 44, jan./mar. 2007.

HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers**: an introduction to nutrient management. 7. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515p.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, New York, v. 37, n. 3, p. 249-315, 1984.

HEDLEY, M.J.; HUSSIM, A.; BOLAN, M.S. New approaches to phosphorus fertilization. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1, 1990, Manila, Los Banos. **Proceedings...** Manila: IRRI, 1990, p. 125-142.

HEDLEY, M.J.; BOLAN, N.S. Development in some aspects of reactive phosphate rock research and use in New Zeland. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 37, p. 861-884, 1997.

HEINRICHS, R. et al. Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.1157-1164, 2008.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, p. 173-195, 2001.

HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. **Boletim de informações agrônômicas**. POTAFÓS, n. 102, p. 01-40, junho, 2003.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba, SP: POTAFOS/ANDA. 24p, 2003. CD-ROM.

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

KAMINSKI, J.; F. A. F. MELLO. Épocas de aplicação de fosfatos em relação ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, n.3, p. 297-300, 1984.

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

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.30, p.159-206, 1978.

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.

KORNDORFER, G. H.; CABEZAS, W. A. L.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais na cultura do milho. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p.145.

KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999.

LANA, R.M.Q.et al. 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.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. **A indústria de fosfatos no Brasil:** rumos alternativos para aproveitamento de subprodutos e redução de impactos ambientais. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 1996.

LAPIDO-LOUREIRO, F.E. **Fertilizantes e sustentabilidade:** o fósforo na agricultura brasileira. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2005.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, n.19, n. 1, p.151-210, 1967.

LEHR, J. R.; G. H. McCLELLAN. **A revised laboratory reactivity for evaluating phosphate rocks for direct application**. Muscle shoals: National Fertilizer Development Center, 1972, 36p. (Bulletin, Y- 43).

LEÓN, L.A.; FENSTER, W.E. **El uso de rocas fosfóricas como fuente de fósforo en suelos ácidos e infértiles de Sur América**. Muscle Shoals : IFDC/Cali : CIAT, 1980. 24p.

LEÓN, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.50, n.3, p.798-802, 1986.

LIN, C., BUSSCHER, W.J., DOUGLAS, L.A. Multifactor kinetics of phosphate reactions with minerals in acidic soils. I. Modeling and simulation. **Soil Science of America Journal**, Madsion v.47, p.1097-1103, 1983.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibrium in soils**. Toronto: John Willey, 1979. 449 p.

LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado"**: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Potafós, 1984. 162p.

LOPES, A.S.; DAHER. E. Agronegócio e recursos naturais no cerrado: desafios para uma coexistência harmônica. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS NATO, A. L. de (ed.). **Savanas: desafios a estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. cap. 5, p. 173-209.

LOPES, A. S. et al. The Saga of the Agricultural Development of the Brazilian. **Electronic International Fertilizer Trimestral**, Switzerland, v. 32, 2012.

LOPEZ, A. S. Fosfatos naturais. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H., **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.65-66.

LUCENA, L. F. C. et al. Resposta do milho a diferentes dosagens de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 334-337, 2000.

MAHIMAIRAJA, S.; BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J. Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: na incubation experiment. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 40, n. 2, p. 93-104, 1995.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. Ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

McLEAN, E.O.; WHEELER, R.W.; Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. I. Growth chamber studies. **Soil Science Society of America Proceeding**, Morgantown, v. 28, p. 545-550, 1964.

McLEAN, E.O.; WHEELER, R.W.; WATSON, J.D. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. II. Growth chamber and field corn studies. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 29, p. 625-628, 1965.

McLEAN, E.O.; BALAM, B.S. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. III. Uptake by corn from soils of different calcium status. **Soil Science Society of America Proceeding**, Morgantown, v. 31, p. 811-814, 1967.

McLEAN, E.O.; LOGAN, T.J. Sources of phosphorus for plant growth in soil with different phosphorus fixation tendencies. **Soil Science Society of American Proceedings**, Morgantown, v. 34, p. 907-811, 1970.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute p.525-536, 1987.

MOKWUNYE, A.U.; CHIEN, S.H. Reactions of partially acidulated phosphate rocks with soils from the tropics. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 477-482, 1980.

NOVAIS, R.F. et al.. Absorção de fósforo e crescimento do milho com sistema radicular parcialmente exposto à fonte de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 749-754, 1985.

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

NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

NWACHUKU, D.A.; LOGANATHAN, P. The effect of liming on maize yield and soil proprieties in Southern Nigeria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.22, p.623-639, 1991.

NYING, C.S.; ROBINSON, S. J. Factors influencing the dissolution of phosphate roc in a range of high P-fixing soils from Cameroon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.37, p. 2627-2645, 2006.

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

OBA, C.A.I. **Fabricação de um fertilizante organo-fosfatado**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, 35 p. (Série de Estudos e Documentos n. 62).

OLIVEIRA, E.L.; MUZILLI, O.; IGUE, K. & TORNERO, M.T.T. Avaliação da eficiência agronômica de fosfatos naturais. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 63-67, 1984.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; PROCHNOW, L.I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.623-631, 2008.

ONO, F. B. et al. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 33, n. 3, p. 727-734, 2009.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 01-46, 1978.

PEREIRA, F. (2003): **Production d'acide phosphorique par attaque chlorhydrique de minerais phosphatés avec réduction des nuisances environnementales et récupération des terres rares**. Tese de doutorado, Universidade Jean Monnet/Escola de Minas de Saint-Étienne – França, 228p.

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.

PRADO, G. R. et al. Comportamento de superfosfato simples contendo fosfato de ferro de baixa em solubilidade água em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 3, p. 907-916, 2011.

PROCHNOW, L. I. et al. Characterization and agronomic evaluation of single superphosphates varying in iron phosphate impurities. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 293-302, 2003.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 605-663.

PROCHNOW, L.I. et al. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p.761-768, 2004.

PROCHNOW, L. S.; FRANCISCO, J. F. B.; BRAGA, E. A. G. Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, v. 4, p. 333-340, 2006.

RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, IAC, 1983. p.1-31. (Boletim Técnico, 81)

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

RAIJ, B. VAN et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Boletim técnico 100 . 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundação IAC, 1996. 285 p.

RAIJ, B.VAN et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**: volume 1. 2. ed. Piracicaba: IPNI, 2011.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1996.

RAJAN, S.S.S.; CASANOVA, E.; TRUONG, B. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rocks, with a case-study analysis. In: ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. 13 ed, Roma: FAO. p. 41-57, 2004.

REDDY, D.D. et al. 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.

REIN, T.A. et al. Avaliação agrônômica do concentrado fosfático de Patos de Minas tratado com bissulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 171-177, 1988.

RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado**. 2004. 169 f. Tese Doutorado, Universidade Federal de Lavras, 2004.

RESENDE, A.V.et al. 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. , p. 458-466, 2006.

ROSSI, C. **Crescimento e nutrição do braquiarião em latossolos dos campos das vertentes (MG) sob influência da calagem e fontes de fósforo**. 1995. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of Phosphate in Soils. In.: KHASAWNEH, F E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of Phosphorus in Agriculture**, Madison: American Society of. Agronomy, 1980. cap. 11, p.263-310.

SANCHEZ, P. A. Soil fertility and hunger in Africa. **Science**, Washington, v. 295, p. 2019-20120, 2002.

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. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 471-514.

SANZONOWICZ, C.; LOBATO, W.J. **Uso de fosfatos naturais em pastagens**. Planaltina, DF: EMBRAPA-CPAC, 1986. 33P. (Circular técnica, 21).

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, p. 233-243, 1987.

SCHOLEFIELD, D. et al. A comparison of triple superphosphate and Gafsa ground rock phosphate fertilizers as P-sources for grass – clover swards on a poorly-drained acid clay soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 53, p. 147-155, 1999.

SILVA, J.T.A.; BRAGA, J. M. Sensibilidade de extratores de fósforo e nível crítico de dez solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 39, n. 226, p. 542-533, 1992.

SILVEROL, A.C.; MACHADO FILHO, L. Utilização de pó de granito e manto de alteração de piroxenito para fertilização de solos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, v.2, n.1, p.703-707, 2007.

SILVEROL, A.C. et al. Compostos organofosfatados obtidos pelo processo Humifert. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v.21, p.86-98, 2007.

SIS, H., CHANDER, S.; Reagents Used in the Flotation of Phosphate Ores: A Critical Review. **Minerals Engineering**, Oxford, v.16, p. 577-585, 2003.

SMALLBERGER, S.A. et al. Development and validation of a Phosphate Rock Decision Support System. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 471-483, 2006.

SOARES, W.V. et al. Avaliação do fosfato natural de Gafsa para recuperação de pastagem degradada em Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.819-825, 2000.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo .In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: EMBRAPA CERRADOS, 2002. p. 147-68.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Piracicaba, SP: POTAFOS, 2003. 16p. (Informações Agronômicas, 102)

SOUSA, D.M.G. de; REIN, T.A.; LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9 .; SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: anais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008.

SOUSA, D.M.G. et al. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 2. p. 71-126.

STAMFORD, N.P. et al. Agronomic effectiveness of biofertilizers with phosphate rock, sulphur and *Acidithiobacillus* for bean grown on a Brazilian tableland acidic soil. **Bioresource Technology**, Essex, v. 98, n. 6, p. 1311-1318, 2007.

STRYKER, R.B.; GILLIAM, J.W.; JACKSON, W.A. Nonuniform transport of phosphorus from single roots to the leaves of *Zea mays*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 30, p. 231-239, 1974.

SYERS, J.K. et al. Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Barking, v.37, p.1057-1064, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Belmont: The Benjamin Cummings, 1991. p.426-449.

TEDESCO, M.J.et al. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TERMAN, G.L.; MORENO, E .C.; OSBORN, G. Acidulation of phosphate rock in soil. **Soil Science Society of America Proceeding**. Morgantown, v. 28, p. 104-107, 1964.

TERMAN, G.L.; ALLEN, S.E. Response of corn to phosphorus in underacidulated phosphate rock and rock-superphosphate fertilizers. **Journal agricultural Food Chemistry, Washington**, v. 15, p. 354-358, 1967.

THOMAS G. W.; D. E. PEASLEE. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L. M.; J. D. **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of América, 1973. p.115-29.

TIRITAN, C. S. et al. Produção de Matéria seca de milho em função da adubação fosfatada mineral e organomineral. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 6, n. 1, p. 01-07, Jan./jun. 2010.

VAN STRAATEN, P. **Rocks for crops** – Agro minerals of sub - Saharan Africa. ICRAF: International Center for Research in Agroforestry). Nairobi, Kenya. University of Guelph, Ontario. 338p. 2002.

VITTI, G.C.; WIT, A.; FERNANDES, B.E.P. Eficiência agronômica dos termofosfatos e fosfatos alternativos. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...**São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 723p.

XIONG, L. M. et al. Isotopic assessment of soil phosphorus fertility and evaluation of rock phosphates as phosphorus sources for plants in subtropical China. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 63, n. 1, p. 91-98, May 2002.

YOST, R.S.et al. Availability of rock phosphate as measured by an acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 463-468, 1982.

ZAPATA, F.; 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. 172p. (Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 13.)