

**FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLO DA
REGIÃO DO CERRADO, ADUBADO COM
FOSFATOS EM DIFERENTES MODOS DE
APLICAÇÃO E CULTIVADO COM MILHO**

JOSÉ ZILTON LOPES SANTOS

2005

JOSÉ ZILTON LOPES SANTOS

**FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLO DA REGIÃO DO CERRADO,
ADUBADO COM FOSFATOS EM DIFERENTES MODOS DE
APLICAÇÃO E CULTIVADO COM MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2005

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Santos, José Zilton Lopes

Frações de fósforo em solo da região do Cerrado, adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho / José Zilton Lopes Santos. -- Lavras : UFLA, 2005.

65 p. : il.

Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto

Dissertação (Mestrado) – UFLA

Bibliografia

1. Adubação. 2. Fração de fósforo. 3. Solo. 4. Cerrado. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.81

-633.15894

JOSÉ ZILTON LOPES SANTOS

**FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLO DA REGIÃO DO CERRADO,
ADUBADO COM FOSFATOS EM DIFERENTES MODOS DE
APLICAÇÃO E CULTIVADO COM MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de "Mestre".

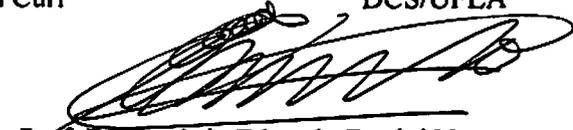
APROVADA em 4 de março de 2005

Dr. Álvaro Vilela de Resende

Embrapa Cerrados

Prof. Dr. Nilton Curi

DCS/UFLA



Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

OFEREÇO

A Deus, por estar sempre ao meu lado durante esta vitoriosa caminhada.

Ao meu pai, Zeila e minha mãe, Zelina, pelos esforços e dedicação para que seus filhos estudassem.

Aos meus irmãos Gilson, Solange, Zilma, Anaene, Josélio, Lauana e Dhyan, pelo incentivo e apoio.

A meu amigo Carlos Borges (*in memoriam*), de quem tenho boas lembranças, mas que infelizmente nos deixou muito cedo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade e apoio concedidos para a realização do mestrado.

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

Ao professor Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto, meu orientador e ao pesquisador Dr. Álvaro Vilela de Resende (co-orientador), pela amizade, orientação, companheirismo e, acima de tudo, pelos ensinamentos para o progresso, tanto na vida profissional quanto social.

Aos demais professores, que acreditaram e dedicaram o seu tempo, contribuindo para a minha formação.

Aos membros da banca, pela participação, críticas e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, pelo apoio e ajuda indispensáveis na realização do trabalho.

Aos colegas de graduação e de pós-graduação, pelo convívio, compreensão, alegrias nos bons momentos e “força” nos momentos difíceis.

Aos alunos de iniciação científica Fabiano e, em especial, ao Sérgio, pela indispensável ajuda na condução das análises laboratoriais.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Dinâmica do fósforo nos solos das regiões tropicais.....	3
2.2 Adubação fosfatada no Brasil	5
2.2.1 Fontes de fósforo	5
2.2.2 Formas de aplicação de fósforo.....	7
2.3 Efeito residual das adubações fosfatadas	8
2.4 Formas de fósforo no solo	9
2.4.1 Fósforo inorgânico no solo (Pi).....	11
2.4.2 Fósforo orgânico no solo (Po).....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Caracterização física, química e mineralógica do solo	16
3.2 Descrição do experimento de campo.....	17
3.2.1 Delineamento experimental e tratamentos	17
3.3 Obtenção das amostras de solo para o fracionamento de fósforo	20
3.4 Fracionamento do fósforo	21
3.5 Análises estatísticas.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Frações inorgânicas de P	26
4.3 Fósforo inorgânico, orgânico e residual	41
4.4 Disponibilidade de P	46

5 CONCLUSÕES.....	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
ANEXOS.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo (0-20 cm de profundidade), antes da aplicação dos tratamentos.....	18
2 Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados.....	19
3 Produção de grãos (kg ha^{-1}), em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos) (Resende, 2004).....	24
4 Extração de P pelo milho e exportação de P nos grãos, em função de fontes e modos de aplicação de fósforo (acumuladas de três cultivos) (Resende, 2004).....	25
5 Fósforo disponível residual (mg dm^{-3}), em função de fontes e modos de aplicação de fósforo, após três cultivos de milho (Resende, 2004).....	26
6 Frações de fósforo inorgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	28
7 Frações de fósforo inorgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	30
8 Frações de fósforo orgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005..	36
9 Frações de fósforo orgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005..	37
10 Frações de fósforo em amostras de solo, do tratamento testemunha no primeiro e segundo ano de cultivo. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	39

11	Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P-rdu) e fósforo total recuperado (P-total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	43
12	Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P-rdu) e fósforo total recuperado (P-total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	44
13	Frações de P lábil, P pouco lábil, P não-lábil e P total recuperado no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	49
14	Frações de P lábil, P pouco lábil, P não-lábil e P total recuperado no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.....	50

RESUMO

SANTOS, José Zilton Lopes. Frações de fósforo em solo da região do Cerrado, adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. 2005. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

O conhecimento da dinâmica do fósforo no solo é bastante importante para que se otimize o aproveitamento do nutriente pelas plantas, principalmente nos solos tropicais. No presente trabalho, objetivou-se quantificar as frações de fósforo num Argissolo Vermelho da região do Cerrado, em função de diferentes modos de aplicação de fontes de fósforo com solubilidade distinta, e após três cultivos sucessivos com milho. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial 4 x 3+1, envolvendo quatro fontes de P, na quantidade de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo – ST, termofosfato magnesiano – TM, fosfato natural reativo de Arad – FR e fosfato natural de Araxá – FA), três formas de aplicação (a lanço em área total no primeiro ano, localizada no sulco de plantio no primeiro ano e parcelada anualmente no sulco) e uma testemunha (sem P) como tratamento adicional. O fósforo foi fornecido considerando-se os teores totais do nutriente nas fontes. Após o primeiro cultivo, não mais foi feito preparo do solo, tendo os sulcos de semeadura sido abertos com enxada, seguindo sua localização original. Após o último cultivo de milho, foram retiradas amostras de solo, na profundidade de 0-20 cm, para a determinação das formas de P nos diversos tratamentos, conforme o método de fracionamento de Hedley et al. (1982). Os diferentes modos de aplicação e a distinta solubilidade das fontes influenciaram as formas de fósforo no solo. O parcelamento das fontes contribuiu para a presença de maiores teores de P nas frações inorgânica e orgânica. O solo apresentou maiores teores de P no compartimento não-lábil, seguido pelo P pouco lábil e P lábil, independente da fonte e do modo de aplicação. Foram constatadas evidências da participação de frações consideradas pouco lábeis no suprimento de P para o milho. Aparentemente, a braquiária foi eficiente na ciclagem do P de frações consideradas menos disponíveis para a nutrição das plantas de milho.

* Comitê Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto - UFLA (Orientador), Álvaro Vilela de Resende – Embrapa Cerrados.

ABSTRACT

SANTOS, José Zilton Lopes. Phosphorus fractions in soil of the Cerrado region fertilized with phosphates under different methods of application and cultivated with corn. 2005. 65 p. Dissertation (Master in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.*

The knowledge of the dynamics of the phosphorus in soil is very important for increasing the utilization of this nutrient by plants, mainly in tropical soils. In this work, we aimed to quantify the phosphorus fractions in a Red Argisol of the cerrado region as a function of different application methods and phosphorus sources with different solubilities after three successive cultivations with corn. A randomized block design with four replications was used, in a 4x3+1 factorial scheme, involving four P sources in the amount of 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ (triple superphosphate - TS, magnesium termophosphate - MT, Arad reactive rock phosphate - RP, and Araxá rock phosphate - AP), three application methods (broadcasted in the first year, banded in the seeding furrow in the first year, and annually parceled bands in the seeding furrow), and a check plot (without P) as an additional treatment. The applied P ratio was based on the total P₂O₅ content of each fertilizer. After the first cultivation, the soil was no longer revolved and the seeding furrows were opened manually following their original location. After the last corn cultivation, soil samples were collected of 0-20 cm depth for determination of the P fractions in the several treatments, according to the method of fractionation of Hedley et al.(1982).The different application methods and the different solubility of the sources influenced the P fractions in the soil, and the parcelling of the sources contributed to higher values of P in inorganic and organic forms. The soil presented higher amounts of P in the non-labile compartment, followed by moderate-labile and labile independently of the source and application methods. Evidences of the participation of fractions considered little lábil were verified in the supply of P for the corn. Seemingly, the brachiaria was efficient in the P cycling of fractions considered less available for nutrition of corn plants.

* Guidance Committee: Antônio Eduardo Furtini Neto - UFLA (Orientador), Álvaro Vilela de Resende – Embrapa Cerrados.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em função da sua complexa dinâmica no solo e essencialidade como nutriente para as espécies vegetais, o fósforo (P) é um dos elementos mais pesquisados em fertilidade do solo e nutrição vegetal. Devido à escassez de P nos solos, em formas disponíveis às plantas, torna-se necessário o uso de maiores doses de fertilizantes fosfatados e a busca de um melhor manejo da adubação, de forma a otimizar a eficiência de aproveitamento desse nutriente pelas culturas.

Os solos das regiões tropicais, particularmente aqueles mais intemperizados, apresentam baixos teores de fósforo disponível e exigem adequada correção da fertilidade para se tornarem aptos à utilização agrícola. A indisponibilização de boa parte do fósforo fornecido na adubação, devido ao fenômeno da fixação de P, que envolve processos de adsorção e de precipitação do elemento em reações com componentes do solo, faz com que a aplicação de maiores quantidades de fosfatos seja necessária quando se almeja maior produtividade das lavouras. Além disso, a magnitude de recuperação e a utilização do nutriente pelas plantas são regidas por vários fatores, dentre os quais, o tipo de fosfato empregado e o manejo da adubação (Sousa et al., 2003).

As fontes de P mais utilizadas nas adubações são as solúveis, as quais possuem grande capacidade de liberação do nutriente para as plantas. Essas fontes apresentam alta eficiência em curto prazo, porém, com maior custo por unidade de P_2O_5 . Como alternativa às fontes solúveis, existem fosfatos de menor solubilidade, como os fosfatos naturais. Estes, apesar de possuírem uma menor disponibilidade imediata do nutriente para as plantas, normalmente apresentam menor custo (Horowitz & Meurer, 2003).

Juntamente com a escolha de uma fonte de fósforo, é necessário definir a melhor forma de aplicação para que se possa alcançar maior eficiência de absorção pela planta e maior eficiência produtiva das culturas. Em solos tropicais, o manejo da adubação deve favorecer a absorção e diminuir os processos de fixação pelo solo e, conseqüentemente, aumentar o aproveitamento do P pelas plantas (Novais & Smyth, 1999). Tradicionalmente, tem-se recomendado a aplicação das fontes solúveis de maneira localizada no sulco de plantio (Prado et al., 2001). No caso dos fosfatos naturais, a distribuição a lanço facilita a solubilização (Sousa & Lobato, 2004), o que, não necessariamente, resulta em aumento na eficiência da adubação (Novais & Smyth, 1999).

As diversas formas de P no solo são afetadas pela natureza do mesmo, pela cobertura vegetal e pelos diferentes tipos de manejo agrônômico. Quando se realiza uma adubação fosfatada, ocorre uma seqüência de eventos físico-químicos, transformando o P aplicado em substâncias complexas, as quais passam a governar a disponibilidade do nutriente no solo. Para que haja melhor entendimento quanto aos condicionantes da disponibilidade de P, vários métodos têm sido desenvolvidos para fracionar as formas do elemento no solo e, com isso, estudar as suas transformações. O P pode apresentar-se em formas de maior ou menor complexidade, ligado, principalmente, a compostos de ferro, alumínio, cálcio e à matéria orgânica (Raij, 2003). Uma das vantagens do fracionamento é permitir relacionar as formas de P no solo à sua disponibilidade para as plantas.

Nesse contexto, estudos que visem a determinação das diferentes frações de fósforo presentes no solo possibilitam conhecer o comportamento do nutriente, podendo, dentro do sistema de produção adotado, indicar um manejo mais eficiente da adubação fosfatada. O presente trabalho teve como objetivo quantificar frações inorgânicas e orgânicas de fósforo em solo da região do Cerrado, em função de diferentes modos de aplicação de fontes de fósforo com solubilidade distinta e após três cultivos de milho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dinâmica do fósforo nos solos das regiões tropicais

Devido às condições de intenso intemperismo dos solos nas regiões tropicais, como é o caso do Cerrado, esses solos apresentam uma reduzida fração de P biodisponível que, muitas vezes, está abaixo das exigências mínimas das culturas comerciais. Essa característica está associada à alta capacidade que esses solos têm em reter o P na fase sólida, na forma de compostos de baixa solubilidade (Sousa & Lobato, 2004). Essa retenção se deve à grande afinidade entre o fósforo e outros três elementos químicos do solo: ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca). Os solos brasileiros são ricos principalmente em óxidos hidratados de ferro e alumínio que, junto a caulinita, perfazem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, a parte mais ativa e na qual ocorrem as reações do P com esses compostos (Raij, 2003).

Como consequência dessas reações, ocorre a precipitação do P com Fe, Al ou Ca ou, ainda, a adsorção do P às partículas de óxidos de Fe e Al. Esses processos, genericamente referidos como fixação do P no solo, fazem com que haja uma diminuição de P na solução do solo, uma vez que a precipitação e a adsorção diminuem a solubilidade do P e, conseqüentemente, a possibilidade de haver absorção pelas plantas. Nesse contexto, é importante conhecer os processos de interação do P com compostos de Fe, Al e Ca, estudando-se os fatores que regem o comportamento dos fosfatos no solo.

Quando adubos fosfatados são adicionados ao solo, assim que ocorre a dissolução da fonte, o P passa para a solução do solo. Esta solubilidade será maior ou menor, dependendo de certas condições, tais como a capacidade de reação da fonte com o solo. Após a dissolução, a maior parte do P é retido na fase sólida, formando compostos menos solúveis (Sousa & Lobato, 2004).

Quando se aumenta o P-solução pela aplicação de fontes minerais ou orgânicas, ocorre um desequilíbrio entre o P-solução e o P-fase sólida e, com isso, haverá um aumento da adsorção (formação do P lábil) e ou da difusão, (transporte de P em direção à raiz da planta); quanto maior o P-solução, maior será o processo de adsorção e difusão. Para solos tropicais que, na maioria das vezes, apresentam o caráter dreno maior que o caráter fonte de P, o processo de adsorção ocorrerá como o responsável principal na depleção do P-solução em relação à difusão. Isto talvez explique o fato de que, em algumas situações, o uso de uma fonte de liberação mais lenta seja mais eficaz para o desenvolvimento das plantas, comparado ao uso de uma fonte de fácil reatividade e solubilidade (Novais & Smyth, 1999).

À medida que o P-solução diminui, em virtude da absorção, retrogradação (passagem do P solução para uma forma mineral), imobilização ou perdas, o P adsorvido (P lábil) passa a repor o P retirado da solução, o que faz com que haja sempre um equilíbrio entre o P lábil e o P-solução. No entanto, os solos diferenciam-se quanto à resistência em alterar o nível de P lábil em função de mudanças no P-solução, ou vice-versa. Essa característica é denominada fator capacidade de fósforo (FCP) ou poder tampão de P do solo (Novais & Smyth, 1999).

Diante do exposto, solos mais intemperizados e argilosos (maior poder tampão), mantêm mais constante o valor de P-solução quando submetidos à retirada ou adição do nutriente. Isto faz com que a planta otimize a utilização de baixas concentrações de P, quando cultivada em solos com essa característica.

Com o passar do tempo, dependendo das condições de reatividade de P no solo, ocorre a conversão do P lábil em P não-lábil, o que se dá em função de ligações adicionais mais fortes que as primeiras no P lábil, e diminui a reversibilidade da reação. Este processo se torna mais intenso quanto mais

escasso for o nutriente no sistema, como ocorre nos solos com elevado dreno de P (Novais & Smyth, 1999).

2.2 Adubação fosfatada no Brasil

2.2.1 Fontes de fósforo

O P é, entre os macronutrientes primários, o que apresenta maior opção de fontes no mercado, as quais podem variar quanto à solubilidade. Essa variação tem importância quanto à eficiência agrônômica das fontes, pois, quanto maior a solubilidade, mais rápida deve ser a difusão do P no processo de absorção pelas plantas, como também a adsorção pelas partículas do solo.

As principais fontes de P podem ser divididas em: a) fontes com alta solubilidade em água, como é o caso dos superfosfatos simples e triplo; b) produtos insolúveis em água e em ácido cítrico, que incluem os fosfatos naturais brasileiros (Araxá, Patos de Minas, Catalão e outros); c) produtos insolúveis em água e com alta solubilidade em ácido cítrico, entre os quais enquadram-se os termofosfatos; d) os produtos insolúveis em água e com média solubilidade em ácido cítrico, fazendo parte desse grupo os fosfatos naturais sedimentares de alta reatividade (Carolina do Norte, Gafsa, Arad e outros) (Sousa et al., 2004).

Quando analisam-se as opções de fontes de P no mercado, os produtos com alta solubilidade ocupam posição de destaque, correspondendo a mais de 90% do P_2O_5 utilizado na agricultura brasileira. Esses produtos dissolvem-se rapidamente no solo e, com isso, fornecem grande quantidade de P às plantas. Também, devido à forma como essas fontes são comercializadas (grânulos), o manuseio é facilitado e menor é o volume de solo com o qual vão reagir, reduzindo o processo de insolubilização (Prochnow et al., 2003). Em contrapartida ao potencial de fornecimento de P por estas fontes, aparecem entraves, como o elevado custo, pois sua produção requer tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico ou ácido fosfórico, reagentes importados. Além

disso, as rochas fosfáticas do Brasil são de mineralogia extremamente complexa, contendo muitos contaminantes, o que onera a obtenção de fontes solúveis devido à necessidade de processos complexos (Prochnow et al., 2003).

Nos últimos anos, tem aumentado o uso de fosfatos naturais reativos farelados como alternativa ao uso de fontes de alta solubilidade, pois, apesar dos mesmos apresentarem menor solubilidade em água, seu uso tem-se justificado em função de diversos resultados de pesquisa evidenciarem eficiência semelhante à de fontes mais solúveis (Braga et al., 1991), além do menor custo por unidade do nutriente e relativa facilidade de aplicação (Horowitz & Meurer, 2003). Segundo esses autores, a eficiência dos fosfatos naturais reativos está relacionada a vários fatores, entre os quais podem-se citar o material de origem, o tamanho de partículas, as propriedades do solo, o modo de aplicação e a própria espécie vegetal utilizada. Na forma farelada ocorre uma diminuição da eficiência agrônômica para as culturas anuais no primeiro cultivo, mas a eficiência é aumentada no segundo ano (Sousa et al., 2004).

Os fosfatos naturais encontrados no Brasil são, em geral, de origem ígnea e apresentam baixa capacidade de liberação de P para as plantas. Em quase todos os depósitos explorados no Brasil, os minérios correspondem ao produto de intemperismo de rochas primárias, nas quais ocorrem modificações mineralógicas significativas e apresentam complexidade acentuada, além de baixos teores de fósforo. Dessa forma, esses fosfatos apresentam lenta solubilização e, como consequência, sua utilização direta na agricultura tem ocorrido mais como fosfatagem corretiva (Novais & Smyth, 1999).

2.2.2 Formas de aplicação de fósforo

Os modos de adubação mais discutidos na literatura são a aplicação a lanço e a localizada no sulco de semeadura. A adubação a lanço promove maior contato do fertilizante fosfatado com o solo, o que favorece a solubilização, especialmente dos fosfatos naturais, mas, ao mesmo tempo, parece contribuir para uma maior adsorção de P, reduzindo o aproveitamento do nutriente pela planta (Model & Anghinoni, 1992; Prado et al., 2001).

A solubilidade da fonte de P é fator determinante para a escolha do modo de aplicação. Normalmente, recomenda-se a aplicação dos fosfatos de alta solubilidade de forma localizada (em sulco) para culturas anuais em adubações de manutenção. Avaliando-se os efeitos de modos de aplicação e de doses de superfosfato triplo para a cultura do milho, Prado et al. (2001) observaram que os modos de aplicação em sulco simples e sulco duplo foram mais eficientes que a lanço. Segundo Prochnow et al. (2003), uma maior eficiência da aplicação localizada vai depender da dose utilizada. Para baixas doses, o mais recomendado é a aplicação no sulco, pois, assim, diminui o contato dos íons ortofosfatos com os pontos de retenção de P nas partículas do solo, minimizando a fixação e, conseqüentemente, aumentando os seus efeitos imediatos e residuais da adubação.

Em relação às fontes fosfatadas de solubilidade mais lenta, como os fosfatos naturais, a dissolução depende da superfície de contato com o solo, que é aumentada se o fertilizante for aplicado em área total e incorporado (Horowitz & Meurer, 2003; Soares et al., 2000).

2.3 Efeito residual das adubações fosfatadas

As adubações fosfatadas promovem uma liberação imediata de P para a cultura implantada logo após a aplicação, apresentando ainda algum efeito residual, de modo que continua havendo certa liberação de P para os cultivos subsequentes. O efeito residual será mais ou menos duradouro em função da solubilidade da fonte utilizada. Em geral, os adubos fosfatados de alta solubilidade apresentam maior efeito imediato para as culturas, refletindo em altos rendimentos já na primeira safra. Quando se faz uso de fosfatos naturais há um baixo fornecimento inicial de P, porém, com o tempo, principalmente em solos ácidos, observam-se incrementos no rendimento das culturas, podendo a eficiência agrônômica equiparar-se à de uma fonte solúvel (Horowitz & Meurer, 2003; Moreira et al., 2002).

Segundo Sousa et al. (2004), o valor residual de fertilizantes fosfatados solúveis em água é de 60%, 45%, 35%, 15% e 5%, respectivamente, após um, dois, três, quatro e cinco anos da aplicação do fertilizante. Portanto, a realização de uma adubação fosfatada pode possibilitar que as adubações subsequentes venham a ser realizadas com doses mais baixas de P.

Contudo, quando se compara o efeito residual de fontes totalmente aciduladas (como o superfosfato triplo) com o de fosfatos naturais, os resultados de pesquisa são, muitas vezes, contraditórios, o que, provavelmente, se deve às diferentes condições em que os fosfatos foram testados (pH, tamanho de partículas, espécies cultivadas e número de cultivos, entre outros). De modo geral, os fosfatos naturais são considerados produtos com maior efeito residual que as fontes solúveis (Horowitz & Meurer, 2003).

2.4 Formas de fósforo no solo

O P na solução do solo pode ocorrer em diferentes formas, a maioria das quais aniônicas, todas elas derivadas da perda de prótons H^+ da molécula do ácido ortofosfórico (H_3PO_4) sob diferentes condições de acidez. Em $pH \approx 4,0$, acidez comumente encontrada em solos sob cerrado, prevalecem moléculas do ânion $H_2PO_4^-$ (ortofosfato diácido) (Shriver & Atkins, 2003).

A concentração de P na solução do solo depende de fatores intrínsecos de cada fonte do nutriente. Os fosfatos naturais brasileiros (apatitas brasileiras) apresentam reatividade muito lenta, em muitos casos, insuficiente para manter uma concentração satisfatória de P em solução. Por outro lado, para outras fontes, a solubilidade pode ser tão alta que a concentração de P em solução atinge valores indesejavelmente elevados, mesmo que por curto espaço de tempo. Diante disso, deve-se ter em mente que tanto a falta quanto o excesso de solubilidade podem ser igualmente indesejáveis (Novais & Smyth, 1999).

A fração mais importante para a nutrição vegetal é, sem dúvida, o fósforo encontrado na solução do solo que, apesar de apresentar valor muito baixo, reflete o balanço entre os processos de fornecimento, imobilização e absorção pelas plantas. Essa concentração de P na solução do solo pode ser alterada com o fornecimento de fontes minerais ou orgânicas do nutriente. Da mesma forma que ocorre com a fração mineral, a matéria orgânica pode ser fonte, aumentando o P solução, ou ser dreno, diminuindo-o (Novais & Smyth, 1999). De qualquer modo, com o tempo, a tendência é que o fósforo seja transformado em compostos mais estáveis (menos lábeis), reduzindo sua disponibilidade às plantas (Raij, 1991).

Os minerais de fósforo comumente encontrados na natureza são todos ortofosfatos, sendo o principal a fluorapatita. Os fosfatos de metais divalentes e trivalentes, como cálcio, magnésio, ferro, alumínio, manganês e outros têm muito baixa solubilidade em água e também na solução do solo (Raij, 2003).

Existem métodos para caracterizar as formas de P no solo por meio de extrações seqüenciais do nutriente numa amostra, também chamados de fracionamento. O mais conhecido é o de Chang & Jackson (1957), que permite a caracterização, mediante extrações sucessivas, das diversas formas inorgânicas de P. Este método, pela sua simplicidade e possibilidade de revelar a causa da deficiência do nutriente e prever a resposta das culturas à adubação fosfatada, tem sido muito utilizado nos estudos sobre o comportamento químico do P nos solos (Barbosa Filho et al., 1987). A distribuição das formas inorgânicas de P varia de acordo com mineralogia do solo (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Além dos fosfatos inorgânicos, o solo contém fosfatos orgânicos, que podem representar parte considerável do P total (Raij, 2003).

Outro método muito utilizado para a caracterização das diferentes frações de P no solo é o de Hedley et al. (1982), que se baseia na extração seqüencial de formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis, por meio da qual, formas inorgânicas e orgânicas são separadas conforme sua disponibilidade às plantas. A vantagem deste método é a obtenção de informações sobre a disponibilidade de P em curto e longo prazos, por meio da determinação dos valores das frações de P, com variados graus de disponibilidade para as plantas (Schmidt et al., 1997, citados por Silva et al., 2003). O método pode também ser empregado para acompanhar modificações nas formas de P, em decorrência de reações no solo (Araújo & Salcedo, 1997).

Os solos brasileiros, considerando as três frações inorgânicas determinadas pelo método de Chang & Jackson (1957), apresentam, de forma geral, $P\text{-Fe} > P\text{-Al} > P\text{-Ca}$, possivelmente relacionado à natureza do material de origem dos solos (Raij, 2003). De acordo com o método de Hedley et al. (1982), para os solos tropicais, as maiores proporções de P têm sido encontradas nas extrações com NaOH, provavelmente devido à forte relação desta fração com a

[REDACTED]

presença de óxidos de ferro e alumínio, caulinita e matéria orgânica (Araújo & Salcedo, 1997; Conte et al., 2003; Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

Dentre os fatores que regem uma maior ou menor liberação de P para a solução, estão as características físicas do solo. Tokura et al. (2002) encontraram comportamento diferente quanto às frações de P em função da textura. De modo geral, solos de textura média e arenosa apresentaram maiores percentuais de P nas formas pouco lábil e lábil. Por outro lado, os solos argilosos apresentaram maiores percentuais de P nas formas pouco lábil e não lábil.

Outro fator que também tem considerável influência na liberação de P para as plantas é a própria capacidade de extração de P pela espécie cultivada. Silva et al. (2003), avaliando frações de P em latossolos cultivados com braquiária e soja, verificaram que, nos solos com braquiária, havia maiores teores de P nas formas mais lábeis e, conseqüentemente, menores teores nas formas pouco lábeis. Esses resultados demonstram a eficiência da braquiária na extração do nutriente e a possibilidade de melhorar a eficiência da adubação fosfatada em sistemas que envolvam o cultivo daquela gramínea.

2.4.1 Fósforo inorgânico no solo (Pi)

A fração inorgânica de P no solo apresenta-se sob as seguintes formas: a) formas lábeis, sendo aquelas precipitadas ou adsorvidas à fase sólida do solo, mas em equilíbrio com o P-solução e correspondem às frações extraídas com resina e bicarbonato de sódio; b) formas pouco lábeis, que correspondem ao P inorgânico ligado a ferro e alumínio, extraídas com hidróxido de sódio e c) formas não-lábeis, caracterizadas como o P que, em curto prazo, não pode passar rapidamente à forma P-solução por estar envolvido em reações de precipitação com diferentes cátions ou adsorvido com alta energia à fase sólida, correspondendo a P ligado a cálcio e extraído com HCl e formas mais estáveis

de P inorgânico extraído por digestão com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio (Larsen, 1967).

Boa parte do P adicionado aos solos é retida com uma energia tal que seu equilíbrio com o P-solução desaparece, deixando, portanto, de ser útil ao crescimento imediato da planta. Essa forma de P não-lábil deve ser quantificada, compreendida e idealmente controlada, para otimizar a fertilização fosfatada como fator de crescimento de plantas, particularmente para os solos mais intemperizados (Novais & Smyth, 1999). De modo geral, nesses solos predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas mais estáveis física e quimicamente (Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

Galvani et al. (2004), fracionando o fósforo inorgânico de um Latossolo Vermelho distroférico, textura média, em função de fontes de fósforo para a soja, observaram que não houve diferença significativa entre os tratamentos quanto ao P-Al, mostrando baixos valores nesta fração. A fonte solúvel (superfosfato triplo) proporcionou um maior teor de P-Fe, comparada ao fosfato natural (fosfato de Arad).

Alterações nas frações de P no solo em função de adição de diferentes fontes foram observadas também por Barbosa Filho et al. (1987), com um aumento dos teores de P-NH₄Cl (P-facilmente solúvel em água), P-Al e P-Fe quando a fonte adicionada foi o superfosfato triplo, em comparação à adição de fosfato de Araxá parcialmente solubilizado (FAPS).

O P adicionado aos solos nas adubações tende a passar rapidamente para formas menos solúveis. Entretanto, Fernandes et al. (2002), avaliando formas de fósforo em solos de várzeas, observaram que, com o aumento na dose de P, houve incremento do P lábil total, tendo as formas de P inorgânico (P-resina e Pi-bicarbonato) sido as que mais contribuíram para o P lábil total em relação às formas orgânicas (Po-bicarbonato). Outros estudos (Araújo & Salcedo, 1997;

Ferreira & Faria, 1978) evidenciaram aumentos não só nas frações lábeis, mas em todas as frações de P no solo, após aplicações do nutriente.

Analisando alterações de formas de P em três diferentes classes de solos, sob dois tipos de manejo (cultivo em plantio direto e áreas adjacentes não cultivadas), Tokura et al. (2002) constataram que a maior parte do P inorgânico estava na forma de Pi-hidróxido nas duas áreas avaliadas, que é uma forma de P pouco lábil. O mesmo foi constatado por Buehler et al. (2002), avaliando frações de P em diferentes sistemas de cultivos em oxisol na Colômbia. Em princípio, esses resultados são desvantajosos do ponto de vista do aproveitamento das fontes de P, pois esta fração é considerada pouco disponível às plantas.

2.4.2 Fósforo orgânico no solo (Po)

Muita ênfase é dada à fração inorgânica do P no solo, provavelmente devido à prática de uma agricultura com grande aporte de insumos e baixa preocupação ambiental (Novais & Smyth, 1999). Há um certo esquecimento da contribuição da fração orgânica, sendo, em muitos solos, a contribuição dessa fração para a solução do solo maior do que a da fração inorgânica. O P orgânico deveria receber maior atenção nas pesquisas com o nutriente, de maneira a se conhecer a real dimensão do envolvimento do componente orgânico como fonte de P para as plantas, principalmente nas condições dos solos tropicais. O estudo da fração orgânica de P em ecossistemas naturais e agroecossistemas tem resultado não somente em avanços no conhecimento de sua amplitude de variação, formas e mecanismos de estabilização nos horizontes superficiais do solo, mas também na sua contribuição ao suprimento de P para a nutrição das plantas (Tokura, 2001).

Segundo Hedley et al. (1982), as formas orgânicas de P no solo incluem:

- a) P orgânico adsorvido na superfície dos colóides, extraído com bicarbonato de sódio;
- b) P associado a compostos húmicos, determinado por extração com

hidróxido de sódio; c) formas mais estáveis de P orgânico, extraídas juntamente com o P residual, porém, não quantificadas.

Com a mineralização de resíduos de cultivos, ou mesmo da matéria orgânica humificada do solo, o P liberado da biomassa contribui para o incremento do P-solução. Por outro lado, pode haver imobilização temporária do P-solução pela sua incorporação à biomassa microbiana. Essa imobilização é aumentada pela adição de uma fonte de carbono, como resíduos de cultivos com limitado conteúdo de P, para atender ao crescimento da população de microrganismos. Portanto, para a mineralização desses resíduos, há necessidade de imobilizar P por um tempo correspondente ao decréscimo da fonte de carbono (Novais & Smyth, 1999).

O fósforo é o nutriente que forma o gradiente mais acentuado a partir da superfície do solo em sistemas de cultivo com pouco revolvimento do solo (cultivo mínimo ou sistema de plantio direto). O plantio direto caracteriza-se pela manutenção da palhada sobre a superfície do solo. Esse material orgânico, quando em decomposição, mineraliza o fósforo orgânico (Po) e fornece o P inorgânico (Pi) para reassimilação microbiana, absorção vegetal e reação com os componentes minerais. Sendo assim, como o Po lábil é, essencialmente, o produto do metabolismo microbiano e como a microbiota do solo é fundamentalmente quimioorganotrófica, a disponibilidade de substratos de carbono seria fator regulador da síntese do Po. Dessa forma, a adubação fosfatada necessária para atender aos requerimentos de P das culturas, aliada ao uso de práticas conservacionistas que enfatizem o manejo de resíduos orgânicos, pode diminuir, a médio e longo prazos, os problemas de baixa recuperação do P dos fertilizantes, por meio da conversão do Pi do fertilizante para o Po lábil (Guerra et al., 1996).

A distribuição percentual de P orgânico em relação ao P total é muito variável e depende de vários fatores, tais como material de origem, grau de

evolução pedogenética dos solos, teor de carbono e ação dos componentes climáticos, influenciando, em maior ou menor grau, o desdobramento dos compostos orgânicos do solo (Tokura, 2001).

Numa avaliação do conteúdo de fósforo orgânico em amostras de diferentes solos na profundidade de 0-20 cm, Guerra et al. (1996) observaram que o conteúdo de P orgânico total correlacionou-se positivamente com o P total e carbono total nos argissolos, e com o P total, teor de Fe_2O_3 total e teor de argila nos latossolos estudados. Foi observada também grande variação do P orgânico entre os diferentes tipos de solo, sendo detectado um predomínio do P orgânico lábil em relação ao P inorgânico lábil. Em ambas as classes de solo o P orgânico lábil mostrou-se intimamente relacionado com o P disponível, evidenciando o potencial de contribuição da fração orgânica na disponibilidade de P nesses solos. Tais constatações são relevantes, pois, em se tratando de solos de regiões tropicais, nos quais o processo de intemperismo-adsorção é intenso, tornam-se muito importantes os teores de P disponíveis para as plantas no reservatório orgânico (Novais & Smyth, 1999).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de fracionamento de fósforo foi conduzido no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se amostras de solo provenientes de um experimento comparando fontes e modos de aplicação de fósforo para a cultura do milho. O referido experimento foi conduzido nos anos de 2000 a 2003 na Fazenda Boa Vista, município de Itumirim, MG, situado a 21°19'02" de latitude sul e 44°52'14" de longitude oeste, a uma altitude média de 871 m.

A área experimental onde foram coletadas as amostras de solo apresenta Argissolo Vermelho distrófico típico (antigo Podzólico Vermelho-Escuro), textura argilosa. A área havia sido cultivada e adubada há cerca de dez anos, encontrando-se, no momento da implantação do experimento, coberta por vegetação espontânea, dominada por capim braquiária (*Brachiária brizantha*) e servindo ao pastejo bovino.

3.1 Caracterização física, química e mineralógica do solo

As análises químicas de rotina foram realizadas de acordo com as metodologias descritas em EMBRAPA (1997) e englobaram pH em água, determinação de Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e P e K pelo extrator Mehlich-1. Os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn foram extraídos com DTPA e B com água quente. A acidez potencial (H+Al) foi determinada conforme Raij et al. (1987). O fósforo também foi determinado por extração com resina de troca iônica, (Raij et al., 1987).

Foi realizada análise granulométrica pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), utilizando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação rápida (20 minutos), sendo a fração areia (2-0,053 mm) separada através de

tamisação. Foram ainda determinados os teores de óxidos do ataque sulfúrico, conforme Vettori (1969), com modificações da EMBRAPA (1997). Caulinita e gibbsita foram estimados por alocação, a partir de dados do ataque sulfúrico (Resende et al., 1987).

A caracterização química, física e mineralógica do solo, previamente à implantação do experimento, é apresentada na Tabela 1. Observa-se a baixa disponibilidade de fósforo pelos extratores Mehlich 1 (Alvarez V. et al., 1999) e resina de troca iônica (Raij et al., 1996).

3.2 Descrição do experimento de campo

O experimento de campo constou da avaliação de diferentes fontes e formas de aplicação de fósforo na cultura do milho durante três cultivos, nos anos agrícolas 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003 (Resende, 2004).

3.2.1 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento obedeceu à disposição de delineamento em blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas foram delimitadas com área total de 27 m² (5 linhas de 6 m de comprimento e espaçadas 0,9 m entre si), considerando uma área útil central de 10,8 m².

TABELA 1 Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo (0-20 cm de profundidade), antes da aplicação dos tratamentos*.

pH (H ₂ O)	5,2
P - Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	2,0
P - Resina (mg dm ⁻³)	7,8
K (mg dm ⁻³)	34,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,2
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,3
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,5
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	5,0
SB (cmol _c dm ⁻³)	1,6
t (cmol _c dm ⁻³)	2,1
T (cmol _c dm ⁻³)	6,6
V (%)	24,2
m (%)	23,8
S - sulfato (mg dm ⁻³)	12,4
B (mg dm ⁻³)	0,6
Cu (mg dm ⁻³)	1,0
Fe (mg dm ⁻³)	46,6
Mn (mg dm ⁻³)	6,4
Zn (mg dm ⁻³)	0,5
P – remanescente (mg L ⁻¹)	16,8
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	37,0
Areia (g kg ⁻¹)	360,0
Silte (g kg ⁻¹)	100,0
Argila (g kg ⁻¹)	540,0
SiO ₂ (g kg ⁻¹)	125,2
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	156,2
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	102,1
TiO ₂ (g kg ⁻¹)	23,5
P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	0,9
Ct (g kg ⁻¹)	146,0
Gb (g kg ⁻¹)	32,0

*Análises realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciência do Solo da UFLA.

Os tratamentos consistiram de um fatorial (4x3+1), combinando quatro fontes de fósforo na dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (ST-superfosfato triplo, TM-termofosfato magnésiano Yoorin, FR-fosfato reativo de Arad e FA-fosfato de Araxá) e três modos de aplicação (a lança em área total no primeiro cultivo, localizado no sulco de plantio no primeiro cultivo e parcelado no sulco de plantio a cada cultivo), mais uma testemunha, sem o fornecimento de fósforo (tratamento adicional). Foram utilizadas 4 repetições.

A quantidade a aplicar de cada fonte foi calculada com base no teor de P₂O₅ total dos fertilizantes (Tabela 2).

TABELA 2 Caracterização química e física dos fertilizantes fosfatados.

Fertilizantes	Características						Equivalente granulometria CaCO ₃ [#]
	P ₂ O ₅ total	P ₂ O ₅ solúvel	CaO	MgO	SiO ₂		
	-----%						
ST	46,1	38,3*	13,0	-	-	-	Granulado
TM	18,1	17,6**	20,0	7,0	25,0	50	Pó
FR	33,1	9,4**	37,0	-	-	-	Farelado
FA	22,7	4,3**	40,0	-	-	-	Pó

ST – superfosfato triplo; TM – termofosfato magnésiano

FR – fosfato reativo Arad; FA – fosfato de Araxá

* P₂O₅ solúvel em água ** P₂O₅ solúvel em ácido cítrico a 2% (1:100).

[#] Efeito alcalinizante dado em kg CaCO₃ para cada 100 kg do fertilizante.

Na aplicação de P a lanço em área total, os fertilizantes foram distribuídos manualmente em toda a área da parcela experimental e incorporados, com enxada, a cerca de 10 cm de profundidade. Na aplicação localizada, os fertilizantes foram distribuídos no fundo do sulco de plantio. No caso desses dois modos de aplicação, a adubação fosfatada foi realizada apenas no primeiro cultivo, sendo as safras subsequentes dependentes do efeito residual dos tratamentos. No modo de aplicação parcelado no sulco de plantio, a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi dividida em aplicações anuais no sulco de semeadura, fornecendo, portanto, 60 kg ha⁻¹ a cada cultivo.

Para o segundo e terceiro cultivos, não foi feito preparo do solo, sendo os sulcos de semeadura abertos com enxada, seguindo a localização do primeiro cultivo.

3.3 Obtenção das amostras de solo para o fracionamento de fósforo

Após o último cultivo de milho, foram retiradas as amostras de solo para o fracionamento do P, obedecendo ao delineamento do experimento. A amostragem foi feita retirando-se dez amostras simples na área útil de cada parcela (sendo sete amostras coletadas perpendicularmente no sentido de uma das linhas de plantio e mais três amostras em outros pontos da parcela), utilizando trado de rosca, na profundidade de 0-20 cm. Das dez amostras simples foi constituída uma amostra composta. Dessa maneira, os 13 tratamentos, em quatro repetições, totalizaram 52 amostras compostas, nas quais foram determinadas as diferentes frações de P.

Como referência, foi coletada uma amostra composta do solo sob vegetação nativa (profundidade de 0-20 cm), adjacente à área do experimento. Amostras coletadas nas parcelas testemunha, no primeiro e segundo anos do experimento, também foram analisadas, a fim de se caracterizar as frações de P inicialmente presentes no solo.

Todas as amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de malha e armazenadas até serem analisadas.

3.4 Fracionamento do fósforo

A determinação das frações inorgânicas e orgânicas de fósforo no solo foi realizada conforme metodologia de Hedley et al. (1982) com adaptação para o uso de terra fina seca ao ar (TFSA), com exceção do P microbial que não foi quantificado (Figura 1). As frações de P determinadas no solo foram: a) frações lábeis de P ou P disponível, correspondendo ao P extraído pela resina de troca aniônica (P-resina) e ao P inorgânico e orgânico extraído com NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} pH 8,5 (Pi e Po-bic); b) frações pouco lábeis de P, correspondentes às formas inorgânicas ligadas a Fe e Al (Pi-hid) e orgânicas (Po-hid) associadas com compostos húmicos, extraídas com NaOH 0,1 e 0,5 mol L^{-1} ; c) frações não-lábeis de P ligado a Ca, extraído com HCl 1,0 mol L^{-1} (Pi-HCl) e as frações mais estáveis de Pi e Po residuais (P-rdu), extraídas por digestão com H_2SO_4 concentrado e H_2O_2 .

Na extração do P-resina, foram utilizados saquinhos de polietileno de 400 μm de malha, contendo 0,6 g de resina de troca aniônica DOWAX2-X18 saturada com bicarbonato. Para todas as frações (extratos), o P foi determinado por colorimetria, segundo Murphy & Riley (1962).

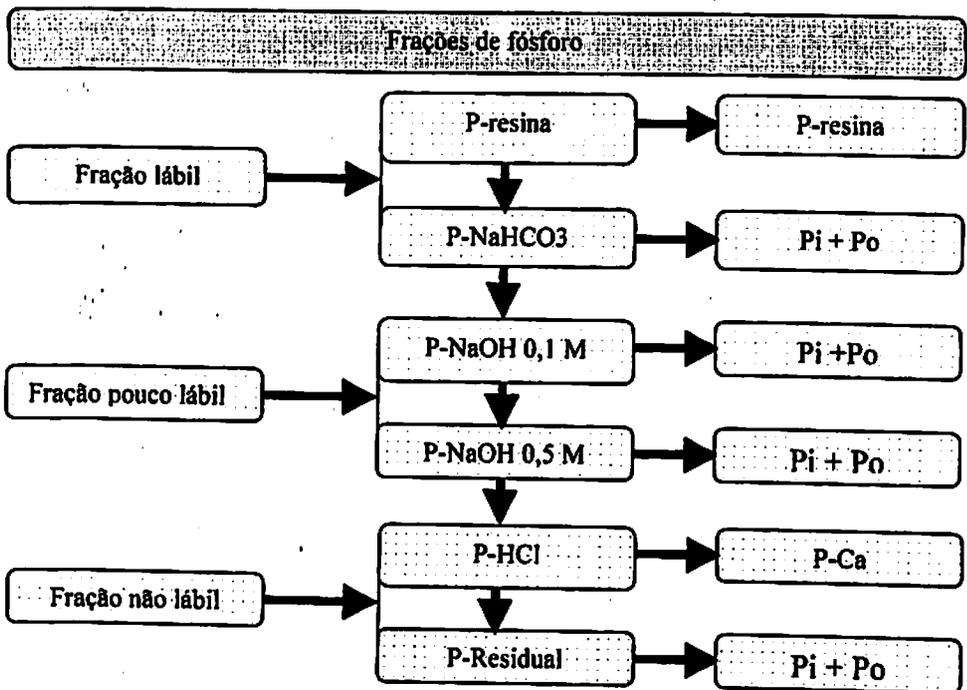


FIGURA 1 Fluxograma operacional do fracionamento de fósforo, segundo Hedley et al. (1982).

3.5 Análises estatísticas

Os resultados obtidos para as diferentes frações de P foram submetidos à análise de variância e comparações de médias, levando-se em conta a estrutura dos tratamentos testados em campo. Foi utilizado o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000). As médias dos tratamentos componentes do fatorial foram comparadas entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Por meio do teste de F ($P \leq 0,05$), obteve-se a significância do contraste, comparando-se a média dos tratamentos do fatorial com a testemunha.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de grãos, extração de P pelo milho e exportação de P nos grãos e P disponível residual no solo, após três cultivos de milho na área experimental, são apresentados a seguir (Tabelas 3, 4 e 5). Esses resultados foram discutidos em detalhes por Resende (2004) e mostram, de forma sucinta, que:

a) foram obtidos dados relativamente semelhantes de produção de grãos (Tabela 3) e de absorção de P pelo milho (Tabela 4) para tratamentos de adubação muito contrastantes; b) apesar da baixa disponibilidade inicial de P no solo (Tabela 1), o tratamento testemunha apresentou produtividade (Tabela 3) e suprimento de P (Tabela 4) consideráveis, sem alteração na disponibilidade do nutriente ao final dos três cultivos (Tabela 5). A explicação para essas respostas, atípicas em condições de solos da região do Cerrado, foi baseada no fato de a área ter sido cultivada e adubada no passado (há cerca de 10 anos antes da instalação do experimento) e, na hipótese da existência de um efeito residual dessa adubação, condicionado pela reserva de P no compartimento orgânico, a qual não seria detectada na análise de solo de rotina, mas teria tido importante participação no suprimento de fósforo para o milho. Adicionalmente, a presença do capim braquiária, planta considerada muito eficiente no aproveitamento e ciclagem de fósforo (Silva et al., 2003; Sousa & Lobato, 2003), antes e durante o período de condução do experimento, pode ter interferido na dinâmica do P no solo, influenciando as respostas do milho aos tratamentos e favorecendo a manutenção dos estoques de formas orgânicas do nutriente (Resende, 2004).

TABELA 3 Produção de grãos (kg ha⁻¹) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo na cultura do milho (acumulada de três cultivos) (Resende, 2004).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	17.998 a A	18.413 a A	17.786 ab A
TM	18.065 a A	19.171 a A	17.609 ab A
FR	16.476 a B	17.925 a AB	19.433 a A
FA	16.920 a A	17.189 a A	15.827 b A
Testemunha	12.535 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 4 Extração de P pelo milho e exportação de P nos grãos em função de fontes e modos de aplicação de fósforo (acumuladas de três cultivos) (Resende, 2004).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Laço	Sulco	Sulco parcelado
.....Extração de P (kg ha ⁻¹).....			
ST	90,3 a A	85,6 ab A	91,7 ab A
TM	94,3 a A	99,1 a A	85,2 ab A
FR	85,8 ab AB	76,5 b B	97,2 a A
FA	73,9 b A	76,7 b A	77,6 b A
Testemunha	50,5 **		
.....Exportação de P (kg ha ⁻¹).....			
ST	79,6 a A	73,5 ab A	79,3 a A
TM	83,3 a A	86,2 a A	73,9 a A
FR	76,5 ab AB	64,8 b B	81,5 a A
FA	63,7 b A	65,0 b A	67,5 a A
Testemunha	44,4 **		
.....Exportação de P (kg t ⁻¹).....			
ST	4,4 a A	4,0 ab A	4,4 a A
TM	4,6 a A	4,5 a A	4,2 a A
FR	4,7 a A	3,6 b B	4,2 a A
FA	3,8 b A	3,8 b A	4,3 a A
Testemunha	3,6 **		

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

TABELA 5 Fósforo disponível residual (mg dm^{-3}) em função de fontes e modos de aplicação de fósforo, após três cultivos de milho. (Resende, 2004).

Fontes de P	Modos de aplicação		
	Lanço	Sulco	Sulco parcelado
ST	10,0 a B	10,2 a B	17,1 b A
TM	9,7 a B	10,5 a B	16,3 bc A
FR	12,1 a B	13,2 a B	24,9 a A
FA	9,8 a A	11,1 a A	12,0 c A
Testemunha	8,7 **		

Fósforo disponível extraído com resina de troca iônica.

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas ou maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (Teste F, $p < 0,01$).

Diante do exposto, a determinação do balanço de frações inorgânicas e orgânicas de P, resultantes dos diferentes tratamentos de fornecimento do nutriente e após os três cultivos de milho, pode fornecer mais subsídios para o entendimento das respostas da cultura à adubação fosfatada e da dinâmica do P em áreas já adubadas anteriormente.

4.1 Frações inorgânicas de P

O P inorgânico do solo inclui frações extraídas com resina (P-resina), bicarbonato (Pi-bic), hidróxido de sódio (Pi-hid) e com ácido clorídrico (P-HCl). Essas frações de P, de modo geral, são as que apresentam interesse direto para a nutrição das plantas, uma vez que a absorção do nutriente se dá na forma inorgânica (Malavolta et al., 1997). De acordo com as pressuposições do fracionamento de Hedley et al. (1982), existe uma diminuição na labilidade das

frações inorgânicas de P na seguinte seqüência: frações lábeis (P-resina > Pi-bic), frações pouco lábeis (Pi-hid 0,1M > Pi-hid 0,5M) e frações não-lábeis (P-HCl).

Houve interação significativa dos fatores fontes e modos de aplicação de fósforo sobre as diferentes frações inorgânicas de P (Tabela 1A).

Em relação ao P-resina, observam-se diferenças de resposta aos tratamentos com ST, comparativamente às demais fontes (Tabela 6). A aplicação do ST a lanço no primeiro ano proporcionou menor valor de P-resina que as aplicações no sulco (no primeiro ano ou parcelada). Possivelmente, o contato com maior volume de solo (aplicação a lanço) por período prolongado favoreceu a passagem do P para formas menos disponíveis. Maior eficiência da adubação fosfatada com fonte de alta solubilidade (superfosfato triplo) aplicada de forma localizada foi demonstrada por Model & Anghinoni, (1992) e Prado et al. (2001) para a cultura do milho. A adubação localizada diminui os processos de adsorção do P aos colóides do solo, fazendo com que o nutriente permaneça mais disponível para a cultura. Todavia, apesar de significativas estatisticamente, a magnitude das diferenças obtidas nos valores de P-resina no fracionamento (Tabela 6) não teria maior relevância para a interpretação agrônômica dos resultados, uma vez que os teores de P determinados nessa fração foram, de modo geral, muito baixos.

No caso das demais fontes, a menor solubilidade dos fosfatos, associada ao parcelamento da aplicação, parece ter limitado a presença de formas mais prontamente disponíveis que seriam extraídas pela resina e bicarbonato (Tabela 6). Utilizando resina trocadora de ânion em membrana para avaliar a dessorção de fósforo em alfissolos do nordeste, Gana Abekoe et al. (1998) obtiveram recuperação do nutriente variável em função das fontes de P utilizadas. Na ordem, as fontes se comportaram da seguinte maneira: superfosfato simples > rocha fosfática parcialmente acidulada > rocha fosfática natural. A menor

dessorção apresentada pela rocha fosfática natural pode ser em função da baixa taxa de substituição de fosfato por carbonato na mesma.

TABELA 6 Frações de fósforo inorgânico no solo em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹					
	P-res	Pi-bic	Pi-hid 0,1 M	Pi-hid 0,5 M	P-HCl	Pi-total
	-----mg kg ⁻¹ -----					
ST Lanço	1,1 b	15,1 ab	7,7 b	6,2 a	0,62 c	30,7 b
ST Sulco	1,3 a	15,0 b	10,0 a	3,9 c	0,92 b	31,2 b
ST Parcelado	1,4 a	15,3 a	10,4 a	5,1 b	0,98 a	33,1 a
Média	1,3	15,1	9,4	5,1	0,84	31,7
TM Lanço	1,3 a	14,9 a	8,8 b	5,1 b	0,92 a	31,0 b
TM Sulco	1,3 a	15,1 a	8,2 b	5,1 b	0,94 a	30,7 b
TM Parcelado	1,0 b	13,9 b	12,4 a	7,3 a	0,90 a	36,0 a
Média	1,2	14,6	9,8	5,8	0,92	32,6
FR Lanço	1,3 a	15,0 a	8,5 b	4,1 b	0,93 ab	29,8 b
FR Sulco	1,3 a	15,0 a	7,9 b	4,8 b	0,91 b	30,0 b
FR Parcelado	0,9 b	13,7 b	10,0 a	6,4 a	0,96 a	32,0 a
Média	1,2	14,6	8,8	5,1	0,93	30,6
FA Lanço	1,4 a	14,9 b	7,8 b	4,7 b	0,92 a	29,7 b
FA Sulco	1,4 a	15,3 a	8,5 b	4,2 b	0,95 a	30,9 b
FA Parcelado	1,0 b	13,7 c	10,9 a	7,1 a	0,94 a	33,7 a
Média	1,3	14,6	9,1	5,3	0,94	31,4
Testemunha	1,1 **	7,7 **	8,8 ns	5,2 ns	0,6 **	23,4 **
Área nativa ²	0,6	7,0	7,5	5,8	0,61	21,5

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas e para cada fonte não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (teste de F, $p < 0,01$); ns = não significativo, pelo teste de F

¹ P-res = fósforo extraído com resina aniônica; Pi-bic = fósforo inorgânico extraído com bicarbonato; Pi-hid 0,1M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Pi-hid 0,5M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; P-HCl = fósforo extraído com ácido clorídrico; e Pi-total = fósforo inorgânico total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa.

No desdobramento do efeito de fontes dentro de cada modo de aplicação de P (Tabela 7), observa-se menor valor de P-resina para o ST quando aplicado a lanço, ocorrendo o inverso no caso da aplicação parcelada. Nesse modo de adubação, a fração Pi-bic também foi maior no tratamento com ST. Esse comportamento confirma a idéia de que, quando ocorre menor contato e menor tempo de exposição de fontes solúveis no solo, ocorrerá maior contribuição para o P disponível, pois diminuem os processos de fixação (Model & Anghinoni, 1992; Novais & Smyth, 1999). Por outro lado, na aplicação parcelada, o menor tempo para a reação das fontes menos solúveis pode ter sido limitante à solubilização e disponibilidade do nutriente.

Quanto ao modo de aplicação no sulco no primeiro ano, não houve diferença estatística de Pi-bic entre as fontes. Para este modo de aplicação parece ter havido um nivelamento no comportamento das fontes. Esse nivelamento pode ter ocorrido em função do esgotamento mais acentuado do P disponibilizado das fontes mais solúveis (absorção pela cultura e fixação pelo solo) e, concomitantemente, uma maior liberação de P dos fosfatos naturais com o passar do tempo.

Apesar das diferenças estatísticas, a magnitude dos valores de P-resina reflete uma presença pouco expressiva de P inorgânico mais lábil no solo, independentemente dos tratamentos. Além da própria absorção pelo milho, os baixos valores de P-resina podem ser decorrentes da presença expressiva de capim braquiária na área, favorecendo maior extração do P disponível e conversão para formas orgânicas (Motta et al., 2002).

TABELA 7 Frações de fósforo inorgânico no solo em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹					
	P-res	Pi-bic	Pi-hid 0,1 M	Pi-hid 0,5 M	P-HCl	Pi-total
	-----mg kg ⁻¹ -----					
ST Lanço	1,08 c	15,1 a	7,7 a	6,2 a	0,62 b	30,7 a
TM Lanço	1,33 ab	14,9 a	8,8 a	5,1 ab	0,92 a	31,0 a
FR Lanço	1,29 b	15,0 a	8,5 a	4,1 b	0,92 a	29,8 a
FA Lanço	1,40 a	14,9 a	7,8 a	4,7 b	0,92 a	29,7 a
Média	1,27	15,0	8,2	5,0	0,84	30,3
ST Sulco	1,33 ab	15,0 a	10,0 a	3,9 b	0,92 a	31,2 a
TM Sulco	1,33 ab	15,1 a	8,2 b	5,1 a	0,94 a	30,7 a
FR Sulco	1,30 b	15,0 a	7,9 b	4,8 ab	0,91 a	30,0 a
FA Sulco	1,41 a	15,3 a	8,5 b	4,2 ab	0,95 a	30,9 a
Média	1,34	15,1	8,6	4,5	0,93	30,7
ST Parcelado	1,36 a	15,0 a	10,4 b	5,1 b	0,98 a	33,1 b
TM Parcelado	0,99 b	13,9 b	12,4 a	7,2 a	0,90 b	36,0 a
FR Parcelado	0,95 b	13,7 b	10,0 b	6,4 a	0,96 a	32,1 b
FA Parcelado	1,01 b	13,7 b	10,9 b	7,1 a	0,94 ab	33,7 b
Média	1,07	14,1	10,9	6,4	0,94	33,7
Testemunha	1,06 **	7,7 **	8,8 ns	5,2 ns	0,63 **	23,44 **
Área nativa ²	0,63	7,0	7,5	5,8	0,61	21,5

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas e para cada modo de aplicação não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (<) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo, pelo teste de F

¹ P-res = fósforo extraído com resina aniônica; Pi-bic = fósforo inorgânico extraído com bicarbonato; Pi-hid 0,1M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Pi-hid 0,5M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; P-HCl = fósforo extraído com ácido clorídrico; e Pi-total = fósforo inorgânico total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

De modo geral, os teores de P-resina obtidos nas análises de fracionamento (Tabela 6 e 7) foram mais baixos do que os obtidos na análise de rotina, na qual foi utilizada, para a extração, uma mistura de resinas aniônica e catiônica (Tabela 5). Isso tem sido atribuído à maior relação solo:extrator no método de rotina (Motta et al., 2002) e também à utilização da resina apenas

aniônica no fracionamento (Tokura, 2001). Além disso, o P-resina e o P-bic são as frações consideradas como o P que seria prontamente disponível às plantas (Hedley et al., 1982; Rheinheimer & Anghinoni., 2001). Contudo, ainda assim, os valores de P-resina, somados aos de Pi-bic, não guardam relação direta com os valores observados na análise de rotina nos diferentes tratamentos do presente estudo (Tabela 5).

De qualquer forma, considerando que P-resina e Pi-bic seriam as frações mais relacionadas ao P disponível, verifica-se que os tratamentos variando fontes e modos de aplicação de fósforo não apresentaram diferenças marcantes no tocante ao residual dessas formas mais lábeis após os três cultivos de milho (Tabelas 6 e 7). É preciso levar em conta que, apesar das diferenças de reatividade das fontes e das características de contato do P com o solo conforme o tratamento, a absorção pela cultura e os processos de adsorção no decorrer dos três cultivos de milho, além da presença da braquiária durante as épocas de intervalos entre cultivos na área do experimento, devem ter contribuído para nivelar a disponibilidade do nutriente nas distintas formas de manejo da adubação fosfatada.

Deve-se notar que, em relação ao P-resina, o Pi-bic apresentou expressiva contribuição para o Pi total recuperado. Comparando-se os tratamentos com fornecimento de P e a testemunha, observa-se que a diferença na disponibilidade do nutriente se dá essencialmente na fração Pi-bic, visto que o P-resina foi menos influenciado pela adubação fosfatada (Tabelas 6 e 7). Esses resultados concordam com os relatos de Dobermann et al. (2002) e Conte et al. (2003), que observaram aumento da importância das frações mais lábeis de Pi à medida que foi adicionado P ao solo, possivelmente devido à saturação dos sítios de adsorção.

Verifica-se um maior teor de P-resina no tratamento testemunha comparativamente ao solo sob vegetação nativa (Tabela 6), o que seria justificado pelo fato de a área do experimento já ter sido adubada anteriormente à aplicação dos tratamentos. A mesma tendência de resultados pôde ser observada para outras frações inorgânicas de P (Tabela 6), sendo válida a mesma justificativa.

De modo geral, verifica-se que não houve predominância de participação das frações inorgânicas extraídas com hidróxido de sódio (0,1 e 0,5 M) sobre as demais, no compartimento Pi-total (Tabelas 6 e 7), como normalmente ocorre na maioria dos trabalhos conduzidos em solos ácidos (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Tokura, 2004). Isso, possivelmente, se deve ao fato de a maior parte do estoque de P do solo ora estudado estar na forma orgânica, como será visto mais adiante. Porém, entre as frações P-hidróxido verifica-se que a mais expressiva é o P-hid 0,1M. Embora não significativas, as diferenças nos valores de Pi-hid (0,1 e 0,5M) entre testemunha e tratamentos com fornecimento de P comprovam que essas frações, especialmente a P-hid 0,1M, atuam como dreno de P em solos fertilizados (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). No caso em questão, o fósforo estaria ligado a ferro e alumínio (Hedley et al., 1982).

Ao se analisar o comportamento das frações Pi-hid 0,1 e 0,5M nos tratamentos com ST, verifica-se que a adubação a lanço levou a um menor valor de Pi-hid 0,1M e maior Pi-hid 0,5M, o que, provavelmente, se deveu ao favorecimento da conversão do P liberado do adubo para formas mais fortemente retidas (P-hid 0,5M). Abekoe et al. (1998) também observaram maior passagem de P para formas mais resistentes, num Alfissolo, quando a fonte utilizada foi o superfosfato simples, atribuindo o fato da maior solubilidade da fonte favorecer a transformação do P em frações mais resistentes de baixa disponibilidade.



No caso das demais fontes, de menor solubilidade, verifica-se que a adubação no sulco e de forma parcelada, condições que restringem o contato da fonte com o solo, parece ter contribuído para maiores teores de P nas frações Pi-hid (Tabela 6). Este comportamento pode ser atribuído ao fator da aplicação parcelada preservar mais o Pi-hid em relação aos demais modos de aplicação, evitando que o P liberado passe para formas menos disponíveis ainda. Interessante notar que a tendência desses resultados foi oposta à verificada para a fração Pi-bic. Assim, tudo indica que a disponibilização do fósforo residual da aplicação dessas fontes menos solúveis para as culturas dependeria, pelo menos em parte, da conversão do P ligado a ferro e alumínio para formas mais lábeis, processo que demandaria mais tempo em comparação ao P liberado do ST. Por outro lado, apesar da fração P-hid ser caracterizada como pouco disponível por Hedley et al. (1982), a mesma é considerada bastante dinâmica (Rheinheimer et al., 2000; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura, 2004), contribuindo para a liberação de P às plantas, principalmente nas condições de solo pobre em P, como o do presente estudo.

Apesar de haver diferenças estatísticas significativas entre tratamentos para o fósforo extraído com ácido clorídrico (P ligado a cálcio), os baixos valores detectados (sempre menores que 1 mg dm^{-3}) refletem a participação pouco expressiva dessa fração no compartimento de P-inorgânico do solo em estudo (Tabelas 6 e 7), a despeito da natureza química distinta das fontes de P utilizadas. Isso poderia ser atribuído aos baixos conteúdos de Ca dos solos tropicais mais intemperizados, que favorecem a formação de compostos de P ligado a ferro e alumínio (Araújo et al., 1993; Linquist et al., 1996; Lyamuremye et al., 1996; Raij, 1991; Tokura, 2004).

Para todas as fontes testadas, a aplicação localizada no sulco e de forma parcelada a cada cultivo de milho promoveu a manutenção de um maior estoque de P inorgânico total (Tabela 6). Em última instância, esse manejo parece

resultar num maior tamponamento do solo (Tabela 5), o que pode proporcionar maior estabilidade de produção das culturas, especialmente em condições de baixo aporte do nutriente nas adubações.

4.2 Frações orgânicas de P

Ocorreu interação significativa entre os fatores fontes e modos de aplicação de fósforo para todas as frações orgânicas de P (Tabela 2A).

De maneira análoga às frações inorgânicas de P, segundo Hedley et al. (1982), ocorre uma diminuição na labilidade das frações orgânicas na seguinte seqüência: P orgânico extraído com bicarbonato (Po-bic) > P orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M (Po-hid 0,1M) > P orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M (Po-hid 0,5 M).

Em relação à fração Po-bic (Tabelas 8 e 9), o ST, quando aplicado na forma parcelada, proporcionou o maior teor de P, o que não ocorreu no caso das demais fontes. Em princípio, não há evidências que possam explicar claramente esses resultados. Aparentemente, a pronta solubilidade do ST é determinante desse comportamento contrastante. Na aplicação parcelada, o fósforo do ST seguiria uma dinâmica distinta do nutriente presente nas outras fontes, sendo mais imediatamente absorvido e, atendendo à demanda da cultura, havendo preservação dos estoques de P orgânico mais lábil (Po-bic). Quando se trata dos fosfatos menos solúveis (TM, FR e FA), a reação mais lenta no solo poderia fazer com que houvesse redução nos estoques orgânicos mais lábeis em função do forte dreno que representa a absorção do nutriente pelo milho.

Contudo, essa argumentação é inconsistente em relação aos resultados obtidos para o TM, FR e FA nas frações de Po-hid 0,1M e, principalmente, de Po-hid 0,5M (Tabela 8). A fração Po-hid 0,5M agrega formas de P menos lábeis, conforme as pressuposições do fracionamento de Hedley et al. (1982). Entretanto, no modo de aplicação parcelada, foram determinados valores

significativamente mais elevados de Po-hid 0,5M para as fontes menos reativas (Tabela 9), que demandam tempo para serem solubilizadas e então reagirem com os constituintes do solo.

Nesse contexto, é preciso também reconsiderar a questão de “baixa labilidade” do P extraído com hidróxido de sódio (Hedley et al., 1982), fração que, em determinadas situações, parece contribuir de forma importante para a disponibilização de P às plantas (Rheinheimer et al., 2000; Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

De modo geral, as frações de Po-hid, notadamente a 0,1M, foram as que tiveram maior contribuição para o compartimento Po-total (Tabelas 8 e 9), diferentemente do que foi observado para as frações inorgânicas, em que o Pi-bic foi a fração mais importante (Tabelas 6 e 7). Predominância do Po no compartimento considerado pouco disponível (Po-hid) também foi observada para diferentes classes de solo em outros estudos (Araújo & Salcedo, 1997; Tokura et al., 2002).

TABELA 8 Frações de fósforo orgânico no solo em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	Po-bic	Po-hid 0,1 M	Po-hid 0,5 M	Po-total
	mg kg ⁻¹			
ST Lanço	16,6 b	35,2 a	15,5 b	68,3 b
ST Sulco	16,9 b	33,4 a	15,7 b	67,5 b
ST Parcelado	18,0 a	37,1 a	19,7 a	74,8 a
Média	17,2	35,2	17,0	70,2
TM Lanço	16,9 b	33,9 b	15,4 b	66,3 b
TM Sulco	17,6 a	28,2 c	16,6 b	59,7 c
TM Parcelado	8,9 c	53,8 a	30,3 a	92,4 a
Média	14,5	38,6	20,8	72,8
FR Lanço	17,1 a	34,7 a	16,8 b	67,5 a
FR Sulco	17,3 a	29,9 b	15,6 b	62,8 b
FR Parcelado	8,6 b	30,7 b	28,0 a	67,4 a
Média	14,3	31,7	20,1	65,9
FA Lanço	16,8 a	35,2 a	15,9 b	66,4 b
FA Sulco	17,2 a	34,6 a	19,0 b	70,8 a
FA Parcelado	9,2 b	34,3 a	27,4 a	70,9 a
Média	14,4	34,7	20,8	69,4
Testemunha	17,9 **	40,8 **	19,7 ns	79,5 **
Área nativa ²	15,1	41,5	26,4	82,9

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas e para cada fonte não diferem estatisticamente, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo, pelo teste de F.

¹ Po-bic = fósforo orgânico extraído com bicarbonato; Po-hid 0,1M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Po-hid 0,5M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; e Po-total = fósforo orgânico total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

TABELA 9 Frações de fósforo orgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	Po-bic	Po-hid 0,1 M	Po-hid 0,5 M	Po-total
	mg kg ⁻¹			
ST Lanço	16,6 a	35,2 a	15,5 a	68,3 a
TM Lanço	16,9 a	33,9 a	15,5 a	66,3 a
FR Lanço	17,1 a	34,7 a	16,8 a	67,5 a
FA Lanço	16,8 a	35,2 a	15,9 a	66,4 a
Média	16,8	34,7	15,9	67,1
ST Sulco	16,9 a	33,4 ab	15,7 a	67,5 a
TM Sulco	17,6 a	28,2 c	16,6 a	59,7 b
FR Sulco	17,3 a	29,9 bc	15,6 a	62,8 b
FA Sulco	17,2 a	34,6 a	18,9 a	70,8 a
Média	17,2	31,5	16,7	65,2
ST Parcelado	18,0 a	37,1 b	19,7 b	74,8 b
TM Parcelado	8,9 b	53,8 a	30,3 a	92,4 a
FR Parcelado	8,6 b	30,7 c	28,0 a	67,4 c
FA Parcelado	9,2 b	34,3 bc	27,4 a	70,9 bc
Média	11,2	39,0	26,3	76,4
Testemunha	17,9 **	40,82 **	19,7 ns	79,5 **
Área nativa ²	15,1	41,5	26,4	82,9

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas dentro de cada modo de aplicação não diferem estatisticamente, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo, pelo teste de F.

¹ Po-bic = fósforo orgânico extraído com bicarbonato; Po-hid 0,1M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Po-hid 0,5M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; e Po-total fósforo orgânico total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

É importante destacar que, inversamente ao que se observa para as frações inorgânicas (Tabelas 6 e 7), os valores das frações de P orgânico determinados no tratamento testemunha tenderam a ser maiores que aqueles obtidos para os tratamentos com adubação fosfatada (Tabelas 8 e 9). Isso indica que a adição de fosfato ao solo alterou preferencialmente as frações inorgânicas

de P. Na determinação das frações preferenciais de acumulação de P pela adição de doses de fosfato solúvel ao solo no sistema plantio direto, Conte et al. (2001) observaram uma diminuição linear da participação do P_o em relação ao P-total. Uma outra constatação é que todas as frações inorgânicas e orgânicas do tratamento testemunha apresentam valores próximos aos detectados no solo da área adjacente, mesmo após três safras de milho, o que é bastante compatível com o fato de haver um reservatório de P (P orgânico) no solo que não seria determinado na análise de rotina.

Contrariamente ao que seria esperado em termos de respostas no experimento de campo, o tratamento testemunha (sem nenhuma adição de P) produziu 12.535 kg de grãos nos três cultivos de milho (Tabela 3), com extração de 50,5 kg ha⁻¹ de P (Tabela 4), o que correspondeu, respectivamente, a cerca de 65% e 51% da maior produção e extração de P obtidas nos tratamentos com fornecimento do nutriente. Portanto, dada a baixa disponibilidade inicial de P no solo, determinada pelos extratores Mehlich 1 e resina de troca iônica utilizados nas análises de rotina (Tabela 1), poder-se-ia aventar a possibilidade de uma participação expressiva de formas orgânicas no suprimento de P durante os cultivos de milho.

Essa pressuposição é reforçada pelos resultados do fracionamento de P em amostras de solo coletadas nas parcelas testemunha no início do primeiro e do segundo cultivos no experimento de campo (Tabela 10).

TABELA 10 Frações de fósforo em amostras de solo do tratamento testemunha no primeiro e segundo ano de cultivo. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Formas de P	Tratamentos	
	Testemunha (1 ^a ano)	Testemunha (2 ^a ano)
	-----mg kg ⁻¹ -----	
P-resina	0,1	0,4
Pi-bicarbonato	3,9	3,8
Po-bicarbonato	19,1	18,9
Pi-hidróxido 0,1M	10,0	8,0
Po-hidróxido 0,1M	32,3	17,8
Pi-hidróxido 0,5M	6,9	5,9
Po-hidróxido 0,5M	25,9	19,9
P-HCl	0,2	0,3
P-residual	203,1	187,7
P-total	301,8	283,0

No ano de instalação do experimento, o tratamento testemunha apresentava níveis de P inorgânico e orgânico similares àqueles presentes no solo sob vegetação nativa (Tabela 11) de um local adjacente ao experimento (área não utilizada para fins agrícolas). Porém, o teor de P residual (P-rdu) era muito mais elevado, coerentemente com o fato de a área do experimento ter sido cultivada e adubada no passado. Conforme o histórico da referida área (vide Material e Métodos), pode-se supor que a presença do capim braquiária teve papel decisivo na dinâmica e ciclagem do P adicionado em épocas que precederam (cerca de 10 anos antes) a instalação do experimento. Desse modo, as informações oriundas do presente trabalho de fracionamento de P confirmam as hipóteses de Resende (2004), segundo as quais, o capim braquiária estaria envolvido na conversão e estocagem de P em formas orgânicas que posteriormente atenderiam parte do requerimento do nutriente pelo milho,

reduzindo as diferenças de resposta entre tratamentos muito contrastantes quanto ao potencial de disponibilização de fósforo para a cultura (Tabelas 3 e 4).

A braquiária é considerada, por alguns autores (Motta et al., 2002; Silva et al., 2003), como de grande potencial para ciclar o P no solo, a ponto de incrementar substancialmente as taxas de recuperação do nutriente nos sistemas em que essa gramínea faz parte da sucessão de culturas (Sousa & Lobato, 2003).

No caso do presente estudo, na avaliação das diferentes fontes e modos de aplicação de P (Resende, 2004), verificou-se que as taxas de recuperação do P variaram de 30% a 62%, o que não é considerado baixo, principalmente no caso de solos de cerrado como o argissolo em estudo. Esta considerável recuperação do nutriente provavelmente está ligada ao fato da área ter sido adubada em épocas que precederam a instalação do experimento (vide capítulo de Material e métodos), juntamente com a presença da braquiária (*Brachiaria brizantha*). Importante participação da braquiária na recuperação de P num Latossolo muito argiloso adubado com superfosfato simples em doses de 100 a 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi observada por Sousa & Lobato, (2003). Estes autores observaram uma recuperação média de P, após 17 anos, de 36% e 61%, respectivamente, quando a área foi plantada exclusivamente com culturas anuais e quando intercalou-se a *Brachiaria humidicola* por nove anos durante o período.

Note-se que as frações inorgânicas e orgânicas do tratamento testemunha tiveram alguma alteração no decorrer dos cultivos de milho (Tabelas 6, 8) comparativamente à condição inicial (Tabela 10), mas, as variações obtidas não explicam a quantidade de P extraída pelo milho. A despeito da substancial remoção de P com as colheitas (Tabela 4), a maioria das frações manteve-se relativamente constante. Por outro lado, houve marcante redução da fração de P-residual (Tabelas 10 e 11). Esse aspecto leva a crer que o balanço das frações de maior ou menor labilidade, de acordo com o fracionamento de Hedley et al.

(1982), não explica, por si só, a origem do P absorvido pelo milho. Por outro lado, o fracionamento forneceu indicativos da existência de mecanismos envolvendo tamponamento do solo e ciclagem de P que mantém estáveis os estoques do nutriente nos compartimentos que supostamente garantem seu suprimento às plantas (P-res, P-bic e P-hid).

4.3 Fósforo inorgânico, orgânico e residual

A interação dos fatores fontes e modos de aplicação de P foi significativa para as formas inorgânicas, orgânicas e residuais de P (Tabela 3A).

Tanto para o P inorgânico quanto para o orgânico, houve diferença de comportamento das fontes, dependendo do modo de aplicação (Tabela 11). De acordo com os dados, o modo de aplicação parcelada no sulco, que permite menor exposição e tempo de contato das fontes com o solo, proporcionou maiores valores de P_i e de P_o . O manejo envolvendo o parcelamento da dose total de P ao longo dos três cultivos de milho, além de impor certa restrição à absorção pelas plantas, minimiza os processos de indisponibilização do P no solo, o que pode ter resultado em maior saldo de P_i e P_o ao final do experimento.

Na testemunha e área adjacente, a participação do P_i foi menor, enquanto a do P_o foi maior, comparativamente aos tratamentos que receberam fósforo (Tabela 11), indicando uma maior proporção de P em frações orgânicas quando não há fornecimento do nutriente. Aumento da participação do compartimento inorgânico e diminuição do orgânico pela aplicação de fosfato foram verificados por Conte et al. (2001), avaliando frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso, no sistema plantio direto.

De modo geral, observa-se que, para a aplicação parcelada, testemunha e área nativa, os teores de P_o são maiores em relação aos modos de aplicação no sulco e a lanço no primeiro ano (Tabela 11), indicando que uma menor dose

(parcelamento) ou a ausência de aplicação de P (testemunha e área adjacente) contribui para maior preservação do P no compartimento orgânico. Este comportamento independe da fonte (Tabela 11), sugerindo que a solubilidade do fosfato (apesar da amostragem ter sido feita no final do experimento) não altera esta tendência.

No desdobramento do fator fontes dentro de modos de aplicação (Tabela 12), verifica-se que, no modo de aplicação parcelada, a fonte TM apresentou maiores valores de P_i e P_o e menor P residual. Por sua vez, os fosfatos naturais (FR e FA) apresentaram maior contribuição para a fração residual, comparativamente às fontes mais solúveis (ST e TM). Possivelmente, a natureza peculiar e a característica de solubilidade do termofosfato (intermediária entre o ST e os fosfatos naturais) e a baixa reatividade dos fosfatos naturais são os fatores responsáveis pelo comportamento diferencial dos fertilizantes evidenciado nesse modo de aplicação.

TABELA 11 Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P-rdu) e fósforo total recuperado (P-total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	Pi	Po	P-rdu	P-total
	-----mg kg ⁻¹ -----			
ST Lanço	30,7 b	68,3 b	102,6 b	200,3 a
ST Sulco	31,2 b	67,5 b	110,0 a	208,3 a
ST Parcelado	33,1 a	74,8 a	103,4 b	207,5 a
Média	31,7	70,2	105,3	205,4
TM Lanço	31,0 b	66,3 b	108,2 a	204,0 b
TM Sulco	30,7 b	59,7 c	106,0 a	196,4 b
TM Parcelado	36,0 a	92,4 a	100,2 b	228,1 a
Média	32,7	72,8	104,8	209,5
FR Lanço	29,8 b	67,5 a	105,9 a	200,8 a
FR Sulco	30,0 b	62,8 b	103,8 a	202,2 a
FR Parcelado	32,1 a	67,4 a	109,1 a	208,6 a
Média	30,6	65,9	106,3	203,9
FA Lanço	29,7 b	66,4 b	104,9 b	198,6 b
FA Sulco	30,9 b	70,8 a	106,8 b	204,5 b
FA Parcelado	33,7 a	70,9 a	113,6 a	214,7 a
Média	31,4	69,4	108,4	205,9
Testemunha	23,4 **	79,5 **	101,7 **	201,6 ns
Área nativa ²	21,5	82,9	103,7	209,3

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas e para cada fonte não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo pelo teste de F.

¹ Pi = somatório das frações P-resina, Pi-bic, Pi-hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹ e P-HCl; Po = somatório das frações Po-bic, Po-hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

TABELA 12 Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P-rdu) e fósforo total recuperado (P-total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	Pi	Po	P-rdu	P-total
	-----mg kg ⁻¹ -----			
ST Lanço	30,7 a	68,3 a	102,6 a	200,3 a
TM Lanço	31,0 a	66,3 a	108,2 a	204,0 a
FR Lanço	29,8 a	67,5 a	105,9 a	200,8 a
FA Lanço	29,7 a	66,4 a	104,9 a	198,6 a
Média	30,3	67,1	105,4	200,9
ST Sulco	31,2 a	67,5 a	110,0 a	208,3 a
TM Sulco	30,7 a	59,7 b	106,0 ab	196,4 b
FR Sulco	30,0 a	62,8 b	103,8 b	202,2 ab
FA Sulco	30,3 a	70,8 a	106,8 ab	204,5 ab
Média	30,5	65,2	106,6	202,8
ST Parcelado	33,1 b	74,8 b	103,4 bc	207,5 b
TM Parcelado	36,0 a	92,4 a	100,2 c	228,1 a
FR Parcelado	32,1 b	67,4 c	109,1 ab	208,6 b
FA Parcelado	33,7 b	70,9 bc	113,6 a	214,7 b
Média	33,7	76,4	106,6	214,7
Testemunha	23,4 **	79,5 **	101,7 **	201,6 ns
Área nativa ²	21,5	82,9	103,7	209,3

Médias seguidas de mesmas letras nas colunas e para cada modo de aplicação não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo pelo teste de F.

¹ Pi = somatório das frações P-resina, Pi-bic, Pi-hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹ e P-HCl; Po = somatório das frações Po-bic, Po-hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

No caso dos fosfatos naturais, provavelmente, os maiores valores de P-residual no modo de aplicação parcelada (Tabela 12) devem-se ao menor tempo de exposição a que foram submetidos no solo e corresponderiam ao P dos próprios fosfatos. Os fosfatos naturais tornam-se ainda menos solúveis em condições de menor contato com o solo, passando a formas mais estáveis, pois

ocorre uma saturação de Ca e P no local de reação, restringindo a dissolução das fontes (Novais & Smyth, 1999). Ou seja, em condições de baixa reatividade, essas fontes se tornam ainda mais recalcitrantes no solo.

Quanto ao fósforo total recuperado (P-total), nota-se que, de modo geral, todos os tratamentos, inclusive a testemunha, tenderam a apresentar valores em torno de 200 mg dm⁻³ (Tabelas 11 e 12). Esperava-se que as fontes mais solúveis (ST e TM) apresentassem comportamentos similares entre si e contrastantes com as fontes menos solúveis (FR e FA), em função da variação na reatividade com o solo (Braga et al., 1991). No entanto, o tempo decorrido da aplicação dos tratamentos (3 anos) parece ter nivelado o comportamento dos fertilizantes. Por outro lado, a relativa similaridade na recuperação total do P ao término dos três cultivos de milho está coerente com os resultados relatados por Resende (2004), nos quais chamou a atenção o que poderia ser considerado um “nivelamento” de respostas do milho aos tratamentos (Tabelas 3 e 4), situação atípica em experimentos de adubação fosfatada na região do Cerrado.

As maiores concentrações de P foram verificadas para as frações de P residual, seguidas pelo P orgânico e, por último, P inorgânico (Tabelas 11 e 12). Em termos médios, a fração residual correspondeu à cerca de metade do total recuperado. Estes resultados quanto ao P residual provavelmente se justificam em função das características físicas, químicas e mineralógicas (Tabela 1), em que vale ressaltar o baixo teor de P-remanescente, considerável valor de óxido de ferro do ataque sulfúrico e a textura argilosa. Características que levam a prever uma média a alta capacidade de fixação de P neste solo.

Grande conteúdo de P residual foi encontrado também por Silva et al. (2003) e Fernandes et al. (2002), na avaliação de diferentes classes de solos com diferentes históricos de uso, o que seria justificável por se tratar de solos intemperizados, ácidos e, na maioria das vezes, argilosos (Neufeldt et al., 1999). Além disso, Almeida et al. (2003) e Tokura (2004) relatam uma relação direta

entre P total e P residual, principalmente em solos com maior potencial de dreno de P. Importante participação do P orgânico foi observada por Guerra et al. (1996) que, trabalhando com diferentes classes de solo, entre as quais alguns argissolos, observaram para esses, um valor médio de 30% de P_o em relação ao P-total, evidenciando a grande capacidade desses solos de acumularem o nutriente na forma orgânica.

Considerando que o fracionamento de amostras da parcela testemunha no início do primeiro cultivo (Tabela 10) também corresponde à condição da área previamente à instalação do experimento, conclui-se que a fração P-rdu foi a mais sensível à interferência representada pelos cultivos de milho, visto que os teores iniciais e finais dessa fração são muito distintos (Tabelas 10, 11 e 12). Esse fato pode ser indicativo de que as diversas frações inorgânicas e orgânicas, determinadas conforme o fracionamento de Hedley et al. (1982), não forneceram subsídios suficientes para elucidar, com clareza, a dinâmica do P adicionado com a aplicação das diferentes fontes do nutriente ou a origem do P absorvido pelo milho no tratamento testemunha (Tabela 4). Tudo leva a crer que, independentemente dos mecanismos envolvidos na conversão do P a formas disponíveis para o milho, a fração P-rdu é responsável pelo tamponamento do solo e garantiu o atendimento da demanda da cultura para as produtividades obtidas, mantendo relativamente estabilizados os estoques do nutriente nas frações tidas como mais lábeis.

4.4 Disponibilidade de P

Houve interação significativa dos fatores fontes e modos de aplicação para as formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis (Tabela 4A).

Para a classificação das frações quanto à labilidade, as mesmas foram agrupadas da seguinte forma: frações lábeis ($P\text{-res} + P\text{-i-bic} + P\text{-o-bic}$); frações pouco lábeis ($P\text{-i} + P\text{-o-hid } 0,1 \text{ e } 0,5M$) e frações não lábeis ($P\text{-HCl} + P\text{-rdu}$).

Em relação às frações lábeis, verifica-se que houve uma diferença de comportamento do ST comparativamente às demais fontes (Tabela 13). Para essa fonte, a aplicação parcelada proporcionou maior valor de P-lábil. A pronta solubilidade do ST, associada à minimização do contato com o solo nesse modo de aplicação, justifica tal resultado. Entretanto, apesar de estatisticamente significativa, a pequena diferença em relação aos outros modos de adubação tem significado prático pouco expressivo. Já no caso das demais fontes, o parcelamento implicou, de forma mais intensa, em menor presença de frações lábeis (Tabelas 13 e 14), o que deve ter como causa a menor reatividade dessas fontes, aliada ao contato com reduzido volume de solo e, ainda, à restrição do tempo de reação dos fosfatos, quando comparado aos modos de aplicação implementados no primeiro cultivo. Avaliando o rendimento de matéria seca e a absorção de P pelo sorgo diante do fornecimento de três fontes em um alfissolo de Gana, Abekoe et al. (1998) observaram uma diminuição de rendimento de matéria seca e absorção de P na seguinte ordem: superfosfato simples > rocha fosfática parcialmente acidulada > rocha fosfática no estado natural. A diferença de comportamento é justificada pela diferença de solubilidade entre as fontes. Estes resultados mostram uma maior eficiência das fontes mais solúveis quanto ao fornecimento de P para as culturas em relação às fontes menos reativas.

O parcelamento da adubação também favoreceu maior acúmulo de P nas frações pouco lábeis para todas as fontes e nas frações não-lábeis, no caso dos fosfatos naturais (Tabela 13). As alterações mais sensíveis se deram nas frações pouco lábeis. Convém ressaltar que a maior parte do P presente no compartimento considerado pouco lábil se encontra na fração P-hid 0,1M (Tabelas 6 e 8), a qual é considerada a mais dinâmica no solo dentre as frações pouco lábeis (Araújo et al., 1993; Rheinheimer et al., 2000).

Observando-se o desdobramento do fator fontes dentro de modos de aplicação (Tabela 14), verifica-se que apenas no modo de aplicação parcelada

houve diferença de comportamento entre as fontes quanto à fração P-lábil. Os resultados demonstram que o ST proporcionou maior disponibilidade de P, o que, conforme discutido, estaria coerente com as características das fontes e os fatores envolvidos na aplicação parcelada no sulco. Nos demais modos de aplicação, o prolongado contato com o solo parece ter sido o principal fator envolvido no nivelamento dos efeitos das fontes, conforme seria esperado. Os maiores teores de P pouco lábil e não-lábil nos tratamentos em que os fosfatos naturais FR e FA foram aplicados localizadamente e de maneira parcelada (Tabela 13), possivelmente se devem à menor e mais lenta solubilidade dessas fontes. Esses fatores favorecem a permanência dos fosfatos naturais na forma em que foram aplicados ao solo (Novais & Smyth, 1999; Raij, 1991).

Chama atenção o comportamento do TM quando se compara a magnitude da fração pouco lábil nos modos de aplicação no sulco no primeiro ano e também parcelada (Tabelas 13 e 14). Em princípio, não haveria uma explicação evidente para resultados tão discrepantes. Porém, há concordância com as diferenças na quantidade de P extraída pelo milho nos dois tratamentos (Tabela 4). Em outras palavras, a aplicação da dose total no primeiro ano resultou em menor recuperação de P pouco lábil após os cultivos de milho (Tabelas 13 e 14), mas esse tratamento correspondeu à maior absorção do nutriente verificada no experimento de campo (Tabela 4). O oposto ocorreu quando a adubação foi parcelada. Noutra ótica, a interpretação desses resultados permite inferir que as formas de P determinadas como pouco lábeis contribuam efetivamente para o suprimento do nutriente para o milho. Assim sendo, as informações do presente estudo reforçam as afirmações de outros autores (Araújo et al., 1993; Rheinheimer et al., 2000) de que essas formas de P são dinâmicas e participam no aporte do nutriente às culturas.

TABELA 13 Frações de P lábil, P pouco lábil, P não-lábil e P total, recuperadas no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	P lábil	P pouco lábil	P não lábil	P total
	mg kg ⁻¹			
ST Lanço	32,8 b	67,9 b	103,3 b	200,3 a
ST Sulco	33,3 b	65,8 b	110,9 a	208,3 a
ST Parcelado	34,7 a	77,5 a	104,3 b	207,5 a
Média	33,6	70,4	106,2	205,4
TM Lanço	33,1 b	68,3 b	108,0 a	204,0 b
TM Sulco	34,0 a	58,7 c	106,9 a	196,4 b
TM Parcelado	23,8 c	103,1 a	101,1 b	228,1 a
Média	30,3	76,7	105,3	209,5
FR Lanço	33,3 a	67,2 b	106,8 ab	200,8 a
FR Sulco	33,7 a	62,9 b	104,7 b	202,2 a
FR Parcelado	23,3 b	75,2 a	110,0 a	208,6 a
Média	30,1	68,4	107,2	203,9
FA Lanço	33,1 b	69,3 b	106,9 b	198,6 b
FA Sulco	33,9 a	70,5 b	107,8 ab	204,5 b
FA Parcelado	23,9 c	81,1 a	112,0 a	214,7 a
Média	30,3	73,6	108,9	205,9
Testemunha	26,7 **	78,5 **	102,3 **	201,6 ns
Área nativa ²	22,7	82,2	104,3	209,3

Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas e para cada fonte, não diferem estatisticamente, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo pelo teste de F.

¹ P-lábil = Σ [P-resina + (Pi e Po NaHCO₃)]; P-pouco lábil = Σ (Pi + Po hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹); P-não lábil = Σ (P-HCl + P-residual); e P-total = fósforo total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

TABELA 14 Frações de P lábil, P pouco lábil, P não-lábil e P total, recuperadas no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Tratamento	Frações de P ¹			
	P lábil	P pouco lábil	P não lábil	P total
	mg kg ⁻¹			
ST Lanço	32,8 a	67,9 a	103,3 a	200,3 a
TM Lanço	33,1 a	68,3 a	108,0 a	204,0 a
FR Lanço	33,3 a	67,2 a	106,8 a	200,8 a
FA Lanço	33,1 a	69,5 a	106,9 a	198,6 a
Média	33,1	68,2	106,2	200,9
ST Sulco	33,3 a	65,8 ab	110,9 a	208,3 a
TM Sulco	34,0 a	58,7 c	106,9 ab	196,4 b
FR Sulco	33,7 a	62,9 bc	104,7 b	202,2 ab
FA Sulco	33,9 a	70,5 a	107,8 ab	204,5 ab
Média	33,7	64,5	107,6	202,8
ST Parcelado	34,7 a	77,5 b	104,3 b	207,5 b
TM Parcelado	23,8 b	103,1 a	101,1 b	228,1 a
FR Parcelado	23,3 b	75,2 b	110,0 a	208,6 b
FA Parcelado	23,9 b	81,1 b	112,0 a	214,7 b
Média	26,4	84,2	106,8	214,7
Testemunha	26,7 **	78,5 **	102,3 **	201,6 ns
Área nativa ²	22,7	82,2	104,3	209,3

Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas e para cada modo de aplicação, não diferem estatisticamente, pelo teste de tukey, a 5% de probabilidade

** = média do tratamento-testemunha difere (< ou >) em relação à média do fatorial (teste de F, $P < 0,01$); ns = não significativo pelo teste de F.

¹ P-lábil = Σ [P-resina + (Pi + Po NaHCO₃)]; P-pouco lábil = Σ (Pi + Po hid 0,1 e 0,5 mol L⁻¹); P-não lábil = Σ (P-HCl + P-residual); e P-total = fósforo total recuperado.

² Dados relativos a uma amostra de referência coletada em área sob vegetação nativa

É importante ressaltar que, na média dos tratamentos, as formas orgânicas (Tabela 8) representaram, aproximadamente, 52% e 76% do P das frações lábil e pouco lábil (Tabela 13), respectivamente. Grande participação do Po no compartimento P lábil também foi demonstrada por Guerra et al. (1996).

No presente estudo, a relevância do compartimento orgânico pode ter sido acentuada pelo pouco revolvimento do solo e pela presença da braquiária.

A braquiária tem sido apontada como planta de grande capacidade de absorção de P, sendo apta ao aproveitamento de formas do nutriente consideradas pouco disponíveis para a maioria das culturas. Em experimento com braquiária conduzido em Latossolos, Silva et al. (2003) observaram que a gramínea contribuiu para maiores teores de P nas frações mais lábeis (de P_i e P_o), demonstrando seu envolvimento na disponibilização do nutriente. No presente estudo, apesar de a maior parte do P total recuperado ter sido determinada como P-residual (Tabela 11), é provável que a presença da braquiária esteja relacionada à conversão e manutenção do P em formas orgânicas lábeis, passíveis de serem aproveitadas pelo milho. Isso justificaria a grande diferença entre os estoques de P-rdu, no início (Tabela 10) e ao final do experimento de campo (Tabela 11).

5 CONCLUSÕES

o k As fontes e os modos de aplicação de fósforo afetaram, de maneira variável, as frações do nutriente presentes no solo após os cultivos de milho.

o k Independentemente da fonte de P, o parcelamento da adubação condicionou maiores teores do nutriente nas frações inorgânica e orgânica.

O P residual teve maior participação no P total, seguido do P orgânico e, por último, do P inorgânico. O solo apresentou maiores teores de P no compartimento não-lábil, seguido pelas frações pouco lábeis e lábeis.

Foram constatadas evidências de participação das frações consideradas menos lábeis no suprimento de P para o milho.

Aparentemente, a braquiária foi eficiente na ciclagem do P de frações consideradas menos disponíveis para a nutrição das plantas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados do fracionamento, são pertinentes as considerações a seguir sobre a influência das fontes e dos modos de aplicação de fósforo.

Em geral, os efeitos da solubilidade diferencial das fontes sobre as frações de P presentes no solo ao final dos cultivos de milho foram mais visíveis apenas quando a adubação foi parcelada. Nos outros dois modos de aplicação e, apesar das diferenças de fontes, o maior tempo de contato dos fosfatos com o solo parece ter resultado num determinado balanço de frações inorgânicas e orgânicas (Tabelas 6, 7, 8 e 9), de maior e menor labilidade (Tabelas 13 e 14), que não foi dependente do manejo da adubação fosfatada realizada por ocasião do primeiro cultivo. Adicionalmente, considerando o fato de a amostragem de solo ter sido realizada após a terceira safra de milho, é de se esperar que o fracionamento reflita melhor o efeito dos tratamentos implementados no último ano, como foi o caso do modo de adubação parcelada.

Com o parcelamento, a solubilidade da fonte passou a ser o principal fator condicionante da disponibilidade de P para o milho no último cultivo e acabou por afetar também o balanço das frações de P no solo após a colheita. No caso do superfosfato triplo, a pronta solubilização e a liberação do P fizeram com que o atendimento da demanda pelo milho fosse menos dependente das reservas do solo, o que levou à manutenção dos estoques de P de frações inorgânicas e orgânicas (Tabelas 6, 7, 8 e 9), lábeis e pouco lábeis (Tabelas 13 e 14). Já para as demais fontes, a liberação mais lenta de P fez com que houvesse maior mobilização das reservas inorgânicas e orgânicas do solo para atender a demanda da cultura, provocando sensível redução nos estoques das frações mais lábeis de Pi e Po (Tabelas 6, 7, 8, 9, 13 e 14).

Por outro lado, a gradual e restrita liberação do P das fontes menos solúveis, associada ao parcelamento da adubação, parece ter resultado num efeito residual diferenciado em relação ao superfosfato triplo e aos demais modos de aplicação. Aquelas condições certamente contribuíram para que as plantas (milho e vegetação espontânea) otimizassem o aproveitamento do P disponibilizado, convertendo-o a formas orgânicas. Após os três cultivos, o resultado desse processo foi um aparente acúmulo do nutriente nas frações menos lábeis de P_i e, principalmente, de P_o (Tabelas 6, 7, 8 e 9). Na realidade, esse acúmulo aparente seria consequência de uma maior preservação ou menor esgotamento das reservas do solo, especialmente dos estoques orgânicos menos lábeis (P_o -hid 0,5M), uma vez que a ciclagem do P das frações mais lábeis, aquelas constantemente repostas graças ao residual das fontes de menor solubilidade, já seria suficiente para garantir o suprimento do nutriente ao milho.

Segundo essa hipótese, a aplicação parcelada e continuada de fontes menos solúveis seria uma prática favorável à manutenção ou mesmo aumento do estoque de P orgânico no solo, o que seria altamente desejável nas condições de solos tropicais mais intemperizados, como na região do Cerrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEKOE, M. K.; TIESSEN, H. Fertilizer P transformations and P availability in hillslope soils of northern Ghana. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Dordrecht, v. 52, n. 1, p. 45-54, Sept. 1998. .

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas de fósforo e adsorção de fosfatos em latossolos desenvolvidos de basaltos do extremo-sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 985-1002, nov./dez. 2003.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F. CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINASGERAIS. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa, 1999. p. 25-32.

ARAÚJO, M. S.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 643-650, out./dez. 1997.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. Intensidade e formas de acumulação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, n. 3, p. 389-396, set./dez. 1993.

BARBOSA FILHO, M. P.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 11, n. 2, p. 147-155, maio/ago. 1987.

BRAGA, N. R.; MASCARENHAS, H. A. A.; BULISANI, E. A.; RAIJ, B. van.; FEITOSA, C. T.; HIROCE, R. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, n. 3. p. 315-319, set./dez. 1991.

BUEHLER, S.; OBERSON, A.; RAO, I. M.; FRIESEN, D. K.; FROSSARD, E. Sequential phosphorus extraction of a P-labeled oxisol under contrasting agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 66, n. 3, p. 868-877, May/June 2002.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 133-144, July 1957.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 893-900, set./out. 2003.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T.; THEVS, N. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 66, n. 2, p. 652-660, Mar./Apr. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. *Manual de métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E. e CURI, N. Formas de fósforo em solos de várzea e biodisponibilidade para o feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 3, p. 373-383, Mar. 2002.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4. 0. In: *REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA*, 45., 2000, São Carlos, SP. *Programa e resumos*. . . São Carlos: UFScar, 2000. p. 255-258.

FERREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Disponibilidade de fósforo, aplicado em um vertissolo do médio São Francisco, avaliada por métodos químicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 2, n. 2, p. 125-128, maio/ago. 1978.

GALVANI, R.; ESTEVES, J. A. de F.; HOTTA, L. F. K.; ROSELEM, C. A. Fracionamento do fósforo inorgânico no solo em função de fontes de fósforo na soja em semeadura direta. In: *REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 26., 2004, Lages. *Anais...* Lages: UDESC, 2004. 1CD-ROM.

GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. de.; SANTOS, G. de. A.; FERNANDES, M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 4, p. 291-299, abr. 1996.

HEDLEY, M. J.; STEWARD, W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976, Sept./Oct. 1982.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. Anais. . . Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.

LARSEN, S. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy*, New York, v. 19, p. 151-211, 1967.

LINQUIST, B. A.; SINGLETON, P. W.; CASSMAN, K. G. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an ultisol. *Soil Science*, Nebraska, v. 162, n. 4 p. 254-264, Apr. 1997.

LYAMUREMYE, F.; DICK, R. P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: ii. distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Science*, Baltimore, v. 161, n. 7, p. 436-443, July 1996.

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

MODEL, N. S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, n. 1, p. 55-59, jan./abr. 1992.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L. A. C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em latossolo amarelo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1459-1466, out. 2002.

MOTTA, P. E. F.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 349-359, abr./jun. 2002.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. *Analitica Chimica Acta*, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 31-36, 1962.

NEUFELDT, H.; SILVA, J. E. da; AYARZA, M. A.; ZECH, W. Phosphorus fractions under different land-use systems in oxisols of the brazilian cerrados. In: THOMAS, R.; AYARZA, A. *Sustainable land management for oxisols of latin american savanas*. Cali, Colômbia: Centro internacional de agricultura tropical, 1999. 231 p.

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

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, jan./mar. 2001.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: *SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003*, Piracicaba. *Anais. . . Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.*

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

RAIJ, B. van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: *SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003*, Piracicaba. *Anais. . . Piracicaba: Potafos/Anda, 2003. CD-ROM.*

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Interpretação de resultados de análise de solo. In: RAIJ, B. Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São de Paulo*. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. p. 8-13.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p.

RESENDE, A. V. de. *Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado*. 2004. 169 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 11, n. 1, p. 17-23, jan./abr. 1987.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 36, n. 1, p. 151-160, jan. 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 345-354, abr./jun. 2000.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. *Química inorgânica*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003. 816 p.

SILVA, M. A. da.; NÓBREGA, J. C. A.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; SÁ, J. J. G. de.; MARQUES, M.; MOTTA, P. E. F. Frações de fósforo em latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, out. 2003.

SOARES, W. V.; LOBATO, E.; SOUSA, D. M. G. de.; REIN, T. A. Avaliação do fosfato natural de gafsa para recuperação de pastagem degradada em latossolo vermelho-escuro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 4, p. 819-825, abr. 2000.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 102, p. 1-16, jun. 2003. (Encarte Técnico).

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região de cerrados. In: *SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2004*, Piracicaba. Anais. . . Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 157-196.

SOUSA, D. M. G. de.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: *SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

TOKURA, A. M. Efeito do silício nas frações fosfatadas de solos cultivados com arroz e feijoeiro. 2004. 125 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

TOKURA, A. M. Formas de fósforo em diferentes solos sob plantio direto em comparação a áreas adjacentes não cultivadas. 2001. 55 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, out. 2002.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24 p. (Boletim Técnico, 7).

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A Resumo das análises de variância para as frações inorgânicas de fósforo, em função de fontes e modos de aplicação de P no solo e após três cultivos de milho.....	62
TABELA 2A Resumo das análises de variância para as frações orgânicas de fósforo, em função de fontes e modos de aplicação de P no solo e após três cultivos de milho.....	63
TABELA 3A Resumo das análises de variância para as frações inorgânicas, orgânicas e residuais de fósforo, em função de fontes e modos de aplicação de P no solo e após três cultivos de milho.....	64
TABELA 4A Resumo das análises de variância para as frações P lábil, P pouco lábil e P não-lábil.....	65

TABELA 1A Resumo das análises de variância para as frações fósforo inorgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	QM					
		P-res	Pi-bic	Pi-hid 0,1 M	Pi-hid 0,5 M	P-HCl	Pi-total
Fontes de P	3	0,2 **	0,8 **	2,0 **	1,4 **	0,02 **	8,0 **
Modos de aplicação	2	0,3 **	4,1 **	34,4 **	16,6 **	0,05 **	58,3 **
Fontes x modos	6	0,1 **	0,8 **	3,4 **	3,4 **	0,04 **	2,9 *
Fatorial vs adicional	1	0,1 **	182,4 **	0,9 ns	0,04 ns	0,23 **	241,9 **
Tratamentos	(12)	0,1 **	16,5 **	8,0 **	4,5 **	0,05 **	33,3 **
Blocos	3	0,001 ns	0,04 ns	0,8 ns	0,2 ns	0,001 ns	1,4 ns
Resíduo	36	0,002	0,02	0,4	0,3	0,0005	1,0
Total	51						
C.V.tratamentos (%)		4,1	0,9	6,8	11,1	2,5	3,2

*, ** e ns = significativo a 5%, 1% e não significativo pelo teste de F.

P-res = fósforo extraído com resina aniônica; Pi-bic = fósforo inorgânico extraído com bicarbonato; Pi-hid 0,1M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Pi-hid 0,5M = fósforo inorgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; P-HCl = fósforo extraído com ácido clorídrico; e Pi-total = fósforo inorgânico total recuperado.

TABELA 2A Resumo das análises de variância para as trações fósforo orgânico no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	QM			
		Po-bic	Po-hid 0,1 M	Po-hid 0,5 M	Po-total
Fontes de P	3	23,4 **	90,1 **	39,9 **	98,3 **
Modos de aplicação	2	184,8 **	215,1 **	539,3 **	574,6 **
Fontes x modos	6	29,9 **	169,9 **	28,5 **	247,9 **
Fatorial vs adicional	1	29,6 **	123,7 **	0,02 ns	366,7 **
Tratamentos	(12)	54,1 **	153,7 **	114,1 **	274,5 **
Blocos	3	0,1 ns	2,2 ns	4,7 ns	9,6 ns
Resíduo	36	0,1	4,9	3,7	4,7
Total	51				
C.V.tratamentos (%)		2,2	6,3	9,8	3,1

*, ** e ns = significativo a 5%, 1% e não significativo pelo teste de F. Po-bic = fósforo orgânico extraído com bicarbonato; Po-hid 0,1M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,1M; Po-hid 0,5M = fósforo orgânico extraído com hidróxido de sódio 0,5M; Po-total = fósforo orgânico total recuperado

TABELA 3A Resumo das análises de variância para as frações fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po), fósforo residual (P-rdu) e fósforo total recuperado (P-total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	QM			
		Pi	Po	P rdu	P-total
Fontes de P	3	8,0 **	98,3 **	30,5 *	68,5 ns
Modos de aplicação	2	58,3 **	574,6 **	7,7 ns	891,4 **
Fontes x modos	6	2,9 *	247,9 **	79,1 **	204,3 **
Fatorial vs adicional	1	241,9 **	366,7 **	75,1 **	78,6 ns
Tratamentos	(12)	33,3 **	274,5 **	57,7 **	274,4 **
Blocos	3	1,4 ns	9,6 ns	25,0 ns	77,7 *
Resíduo	36	1,0	4,7	9,2	25,3
Total	51				
C.V.tratamentos (%)		3,2	3,1	2,9	2,4

*, ** e ns = significativo a 5%, 1% e não significativo pelo teste de F.

TABELA 4A Resumo das análises de variância para as frações P lábil, P pouco lábil, P não-lábil e P total recuperado (P total) no solo, em função de fontes e modos de aplicação de P e após três cultivos de milho. UFLA, Lavras, MG, 2005.

Fontes de variação	G.L.	QM			
		P lábil	P pouco lábil	P não-lábil	P total
Fontes de P	3	33,6 **	159,0 **	29,0 *	68,5 ns
Modos de aplicação	2	260,9 **	1761,2 **	7,0 ns	891,4 **
Fontes x modos	6	43,9 **	301,1 **	58,5 **	204,3 **
Fatorial vs adicional	1	70,6 **	143,8 **	77,2 **	78,6 ns
Tratamentos	(12)	79,7 **	495,8 **	43,9 **	274,4 **
Blocos	3	0,1 ns	17,1 ns	11,9 ns	77,7 *
Resíduo	36	0,1	10,1	7,4	25,3
Total	51				
C.V.tratamentos (%)		1,2	4,4	2,5	2,4

*, ** e ns = significativo a 5%, 1% e não significativo pelo teste de F.

