



JULIAN JUNIO DE JESÚS LACERDA

**FRAÇÕES INORGÂNICAS E
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM
LATOSSOLOS COM DIFERENTES
MINERALOGIA E HISTÓRICO DE USO,
ADUBADOS COM FOSFATO REATIVO**

LAVRAS - MG

2011

JULIAN JUNIO DE JESÚS LACERDA

**FRAÇÕES INORGÂNICAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM
LATOSSOLOS COM DIFERENTES MINERALOGIA E HISTÓRICO DE
USO, ADUBADOS COM FOSFATO REATIVO**

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

Orientador

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

LAVRAS - MG

2011

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

Lacerda, Julian Junio de Jesús.

Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolos com diferentes mineralogia e histórico de uso, adubados com fosfato reativo / Julian Junio de Jesús Lacerda. – Lavras : UFLA, 2011.
82 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.
Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.
Bibliografia.

1. Solos. 2. Textura do solo. 3. Fracionamento. 4. Adubação fosfatada. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.422

JULIAN JUNIO DE JESÚS LACERDA

**FRAÇÕES INORGÂNICAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM
LATOSSOLOS COM DIFERENTES MINERALOGIA E HISTÓRICO DE
USO, ADUBADOS COM FOSFATO REATIVO**

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

APROVADA em 25 de fevereiro de 2011.

Dr. Álvaro Vilela de Resende EMBRAPA/UFLA

Dr. Francisco Dias Nogueira EPAMIG

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto
Orientador

LAVRAS - MG

2011

Ao Senhor, meu Deus, meu protetor e aos meus pais, José e Helena

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, por seu amor e fidelidade.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade de realização do Mestrado.

À FAPEMIG, ao CNPq, à CAPES pelo auxílio financeiro e concessão de bolsas.

Ao Prof. Antonio Eduardo Furtini Neto pela orientação, apoio e confiança.

Aos professores Carlos Alberto, Valdemar Faquim, Janice Guedes, Marx Leandro, Moacir Dias, Luís Roberto, João José, Nilton Curi e Yuri Zinn por compartilharem o saber e pela constante disponibilidade para ensinar.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Álvaro Vilela de Resende e Dr. Francisco Dias Nogueira pelas correções e sugestões.

Aos orientados do Prof. Furtini, em especial, José Zilton, Leandro, Thiago e César pelo apoio no experimento.

Aos proprietários da Fazenda Alto Alegre, na pessoa do Dr. Edegar Corazza, pelo apoio na obtenção das amostras de solos.

Aos colegas, em especial, Danilo, Marilena, Nilma e Daniela pelos momentos juntos, pelas disciplinas compartilhadas e amizade constante.

Aos funcionários e técnicos do DCS, em especial a Roberto e Wilton.

Aos meus pais, José e Helena, pelo amor.

Aos meus irmãos Janderson e Jeárleson pela força.

A minha namorada Luciene pelo carinho.

Aos amigos da Igreja Adventista do 7º Dia, pelos bons momentos.

Aos amigos de todas as horas: Álvaro, Zinho, João, Thiago, André e Dona Vilma, pela amizade e companheirismo.

A todos que contribuíram com essa realização pessoal e profissional.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu”.

Salomão

RESUMO

O fósforo (P) oriundo dos fertilizantes tende a precipitar-se com alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca), ou ainda ser adsorvido à superfície de partículas de argila e dos óxidos de Fe e Al, tornando-se menos disponível para absorção pelas plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar as formas inorgânicas de acúmulo e disponibilização de P em Latossolos com diferentes mineralogia e o efeito de cultivos anteriores no armazenamento do P após adubação com fosfato natural reativo. Os solos foram coletados na profundidade de 0-20 cm, em áreas cultivadas por dez anos em sistema de plantio direto, áreas cultivadas por três anos com braquiária e áreas não cultivadas. Foram aplicadas quatro doses de P (0, 120, 240 e 480 mg dm⁻³) nos solos, utilizando como fonte o fosfato reativo de Arad. Trinta dias após a aplicação dos tratamentos os solos foram cultivados com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Jalo Radiante). As frações inorgânicas de fósforo ligadas ao Al, Fe e Ca e o P disponível pelos extratores de Mehlich-1, resina trocadora de íons, ácido cítrico e Olsen foram determinadas nos solos antes e após o cultivo do feijoeiro. A aplicação do fosfato natural reativo aumentou os teores de fósforo ligado ao cálcio, ao ferro e ao alumínio, mas após solubilização do fertilizante, o fósforo da fração P-Ca foi mobilizado para as frações P-Al e P-Fe. Os principais compartimentos de fósforo inorgânico no Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) são P-Al e P-Fe. A fração P-Al apresenta estreitas correlações com os teores de P disponível avaliado por diferentes métodos. Extratores alcalinos, como o extrator Olsen podem ser uma boa alternativa, para determinar os teores de P disponível no LVd com histórico de uso sob plantio direto, por liberarem as formas de P-Al, P-Fe, que representam as principais formas de acúmulo nestes sistemas. A qualidade da fração argila dos Latossolos pode ser mais importante que a quantidade para explicar o comportamento do fósforo inorgânico nos Latossolos de cerrado. Métodos de determinação de P disponíveis com ação alcalina se correlacionaram melhor com as frações P-Al e P-Fe. Métodos de extração com ação ácida se correlacionaram melhor com a fração P-Ca. A resina apresentou altos coeficientes de correlação com as três frações de P inorgânico.

Palavras-chave: Latossolos. Frações de fósforo. Textura do solo. Histórico de uso do solo. Mineralogia.

ABSTRACT

Phosphorus (P) from fertilizers tends to precipitate with aluminum, iron, calcium, or even be adsorbed by clay particles surface and Fe and Al oxides, becoming less available for plants absorption. The objective of this work was to evaluate the inorganic forms of accumulation and availability of P in Latosols with different mineralogy and the previous cultivations effect on P stock after reactive phosphate rock fertilizing. The soils were collected at 0-20 cm depth, in areas cultivated for ten years in no-tillage system, areas cultivated for three years with *Brachiaria* and non-cultivated areas. Four P doses were applied (0, 120, 240 and 480 mg dm⁻³) in the soils, using Arad phosphate rock as source. Thirty days after treatments application the soils were cultivated with bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Jalo Radiante). The inorganic P fractions bonded to Al, Fe and Ca and the available P by Mehlich-1, resin ion exchange, citric acid and Olsen extractors were determined in soils before and after bean plant cultivation. The reactive phosphate rock application increased the contents of P bonded to calcium, iron and aluminum, but after fertilizer solubilization, the P-Ca was mobilized to P-Al and P-Fe fractions. The main inorganic phosphorus pools in LVd were P-Al and P-Fe. P-Al fraction presented close correlations to available P contents appraised by different methods. Alkaline extractors, such as Olsen extractor can be a good alternative to determinate available P contents in LVd with no-tillage usage historic, because they release P-Al and P-Fe forms, that represent the main P accumulation forms in these systems. Latosol clay fraction quality can be more important than the clay amount to explain inorganic phosphorus behavior in Cerrado Latosols. The available P determination methods with alkaline action were better correlated to P-Al and P-Fe fractions. Extraction methods with acid action were better correlated to P-Ca fraction. The resin method presented high correlation coefficients to the three inorganic P fractions.

Keywords: Latosols. Phosphorus fractions. Soil texture. Soil usage historic. Mineralogy.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	10
1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Fósforo orgânico e fósforo inorgânico do solo	13
2.2 Métodos de rotina para avaliação da disponibilidade de fósforo no solo	17
2.3 Fosfato natural como fonte fósforo	19
REFERÊNCIAS	22
SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	29
ARTIGO 1 Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolo com diferentes históricos de uso, adubado com fosfato reativo	29
1 INTRODUÇÃO	32
2 MATERIAL E MÉTODOS	34
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 Correlações entre as frações inorgânicas de P, métodos de avaliação da disponibilidade de P e parâmetros de aproveitamento de P pelo feijoeiro	44
3.2 Análise de componentes principais das frações inorgânicas de P e métodos de avaliação de sua disponibilidade	47
4 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
ARTIGO 2 Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolos com diferentes mineralogia e histórico de uso, adubados com fosfato reativo	56
1 INTRODUÇÃO	59
2 MATERIAL E MÉTODOS	61
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
3.1 Correlações entre as frações inorgânicas e a disponibilidade de P em Latossolos com diferentes proporções dos constituintes mineralógicos	69
4 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICES	78

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros, com frequência apresentam baixos teores de fósforo, o que faz com que o agricultor recorra à fertilização química e/ou orgânica para suprir a demanda das plantas (ARAÚJO; SANTOS JÚNIOR, 2009). De modo geral, as práticas da calagem e adubação são responsáveis por cerca de 50% dos ganhos de produtividade das culturas, por isso necessitam ser realizadas da maneira mais eficiente possível (LOPES; GUILHERME, 2000).

Quando os adubos fosfatados são aplicados ao solo, após sua dissolução, praticamente todo o P é retido na fase sólida (SOUSA; LOBATO, 2003), por precipitação com alumínio, ferro, cálcio, ou por adsorção à superfície de partículas de argila e dos óxidos de Fe e Al (RESENDE; FURTINI NETO, 2007).

Todavia, parte do P retido é aproveitado pelas plantas, o que depende principalmente da espécie cultivada, da textura do solo, dos minerais de argila, da acidez do solo, do teor de matéria orgânica, das doses, fontes, granulometria e forma de aplicação do fertilizante fosfatado e do sistema de preparo do solo.

As reservas mundiais de minério de fosfato de alto teor podem se esgotar entre 50 e 125 anos (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; VACCARI, 2009). Logo, se tratando de um recurso natural finito como fósforo é necessário o desenvolvimento de estudos que propiciem maior conhecimento das reações que ocorrem no solo, a fim de aumentar o aproveitamento desse elemento através de estratégias de manejo que permitam maior disponibilidade para as plantas.

Para fazer uma recomendação de adubação fosfatada criteriosa deve-se conhecer o histórico de uso da área a ser fertilizada, incluindo a sequência de

culturas, o tempo de utilização, quantidades e tipos de insumos aplicados, produtividades obtidas e o tipo de preparo do solo realizado. A análise de solo tem sido o instrumento mais utilizado para a recomendação de adubação fosfatada, sendo que os principais métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo nos solos brasileiros são: Mehlich-1 e resina de troca iônica (RAIJ, 2010). No entanto, muitas vezes não há uma boa correlação entre os teores de P determinados por esses extratores e o rendimento das culturas.

Brasil e Muraoka (1997) não encontram boas correlações entre o P extraído pelos métodos da resina e Mehlich-1 e a produção de matéria seca do caupi em solos da Amazônia, tratados com fosfatos de diferentes solubilidades. Sá (1999) relata que a utilização de extratores que avaliam uma pequena proporção do P-inorgânico não permite explicar o nível de resposta das culturas, havendo outros fatores envolvidos que não são quantificados.

Neste sentido, o fracionamento de fósforo tem sido uma boa ferramenta para entender a disponibilidade do fósforo no solo e tem sido útil para estudar a dinâmica do P em diferentes tipos de solos e sistemas de manejo (PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009). A compreensão do modo de ocorrência do fósforo inorgânico nos solos certamente trará novas informações que poderão subsidiar o desenvolvimento de métodos de extração de P disponíveis ou a inclusão de novas variáveis na interpretação dos teores extraídos, o que pode fornecer bons resultados para o aperfeiçoamento da recomendação de adubação fosfatada.

Nesse contexto, os objetivos deste trabalho foram: a) avaliar as formas inorgânicas preferenciais de acumulação de fósforo em Latossolos após aplicação de fosfato natural reativo e as alterações que ocorrem no sistema após o cultivo do feijoeiro; b) avaliar as frações inorgânicas de fósforo e sua disponibilização em Latossolos com diferentes texturas e mineralogia; c) avaliar

o efeito de cultivos anteriores no armazenamento do P inorgânico após adubação com fosfato natural reativo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Entre os macronutrientes essenciais às plantas, o fósforo (P) é o elemento que mais limita a produção das culturas nas regiões do cerrado, por apresentar-se em formas pouco disponíveis aos vegetais e pelas características de elevada adsorção dos solos dessa região (SANTOS; KLIEMANN, 2005).

Nas plantas, o fósforo participa de vários processos metabólicos, como a transferência de energia, síntese de ácidos nucléicos, glicose, respiração, síntese e estabilidade de membrana, ativação e desativação de enzimas, reações redox, metabolismo de carboidratos e fixação de N₂ (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003).

Para adquirir o fósforo em solos com baixas concentrações, as plantas desenvolveram mecanismos de adaptação para maior aproveitamento do elemento. As plantas são capazes de modificar a morfologia, arquitetura, densidade e o comprimento das raízes, além de realizarem associações simbióticas com fungos micorrízicos (RAGHOTHAMA; KARTHIKEY, 2005). Além disso, muitas plantas desenvolveram mecanismos bioquímicos para solubilizar o fósforo inorgânico do solo, essas plantas produzem e exsudam ácidos orgânicos, como malato, citrato e oxalato na rizosfera (SHANE; LAMBERS, 2005).

Lynch e Beebe (1995) relataram que genótipos de feijão eficientes na aquisição do fósforo possuem raízes altamente ramificadas. Outras espécies, como o trigo sarraceno (*Fagopyrum esculentum*), a colza (*Brassica napus*) e os legumes são bastante eficientes na utilização de fosfatos de rocha, como fonte de

fósforo, através de liberação de ácidos orgânicos pela rizosfera (HINSINGER, 2001).

2.1 Fósforo orgânico e fósforo inorgânico do solo

Para melhor entender a dinâmica do fósforo nos solos, é necessário conhecer as diferentes frações do elemento, mediante a utilização sequencial de diferentes soluções extratoras (SILVA; RAIJ, 1999). O método de fracionamento do fósforo no solo desenvolvido por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) tem sido amplamente utilizado para caracterizar as formas orgânicas e inorgânicas de P, que diferem em termos de disponibilidade para as plantas.

As principais formas de fósforo orgânico já identificadas são os fosfatos de inositol, que compõem de 10% a 80% do fósforo orgânico total, os fosfolípidios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres fosfato (5%). Estes compostos são usados como fonte de carbono e elétrons pelos microrganismos, o que resulta em sua mineralização e na disponibilização de fósforo (SANTOS et al., 2008).

As formas inorgânicas de P são estudadas principalmente pelo fracionamento proposto por Chang e Jackson (1957). A metodologia consiste em fracionar o fósforo inorgânico em fósforo solúvel em água (P-H₂O), fósforo ligado a alumínio (P-Al), fósforo ligado a ferro (P-Fe), fósforo ligado a cálcio (Ca-P) e fósforo ocluso. O P-H₂O não deve ser comparado às demais formas porque, as formas P-Al, P-Fe e P-Ca passam a P-H₂O antes de serem absorvidas pelas plantas. Por outro lado, o P-occluso por ser de grande estabilidade em partículas de óxidos de Fe e Al não contribui em curto prazo para o fornecimento às plantas, sua extração é mais difícil do que das outras formas e não tem sido determinado em diversos trabalhos (NOVAIS; SMYTH; NUNES,

2007). Logo, para o fracionamento do fósforo inorgânico do solo geralmente são determinadas as formas P-Al, P-Fe e P-Ca.

A distribuição do fósforo no solo entre as diferentes formas orgânicas e inorgânicas depende, entre outros fatores do tipo de preparo do solo (DAROUB; PIERCE; ELLIS, 2000). Zamuner, Picone e Echeverria (2008) avaliaram a quantidade e a distribuição do P orgânico e inorgânico do solo em diferentes profundidades sob práticas de plantio direto ou preparo convencional e mostraram que no sistema de plantio direto o P microbiano foi significativamente maior em todas as profundidade avaliadas. A disponibilidade de P foi controlada principalmente pelo P orgânico que constituiu a maior proporção do P total.

A textura do solo é outro fator importante para se entender a dinâmica do fósforo. Santos (2008) relata que a participação do compartimento orgânico de P, comparado ao inorgânico, é mais expressiva para os solos com maior teor de argila, mas em solos menos argilosos o comportamento do Po e Pi depende do manejo anterior dos solos.

As relações entre a imobilização e mineralização do fósforo da matéria orgânica também podem influenciar os teores de fósforo no solo. Kolawole, Tian e Tijani-Eniola (2003) estudaram a dinâmica de fósforo no solo durante o pousio com vegetação natural e plantada com *Pueraria phaseoloides* no sudoeste da Nigéria. As frações orgânicas de P aumentaram com o aumento da duração do pousio. Os autores sugerem que o compartimento orgânico pode representar um reservatório ativo (fonte e dreno) de P em cultivos sob condições tropicais, sem aplicação de fertilizantes inorgânicos.

Os sistemas de manejo conservacionistas como os sistemas agroflorestais e de manejo orgânico também influenciam a dinâmica de P. Atividades adotadas em sistemas de produção de café orgânico, como o menor revolvimento do solo, utilização de plantas de cobertura, permanência de

resíduos vegetais e a adição de materiais orgânicos podem favorecer a manutenção e o acúmulo do fósforo orgânico e lábil no solo (PARTELLI et al., 2009). Nos sistemas agroflorestais parte do P inorgânico pode se converter em P orgânico (CARDOSO et al., 2002).

O tipo e as doses do fertilizante também interferem na partição do fósforo no solo. Ceretta et al. (2010) aplicaram material orgânico (dejetos de suínos) em um Argissolo Vermelho Distrófico, em sistema plantio direto e afirmaram que a adição dos dejetos pouco afetou a partição de fósforo entre as frações inorgânicas e orgânicas. Por outro lado, Santos (2008) aplicou superfosfato triplo em Latossolos de cerrado e observou que nas menores doses de P, este se acumula preferencialmente no compartimento orgânico e nas doses mais elevadas, o acúmulo ocorre preferencialmente no compartimento inorgânico.

De modo geral, os trabalhos convergem para o fato de que o compartimento orgânico é um importante reservatório de fósforo nos solos, sendo influenciado pelos sistemas de manejo, fornecimento de adubos e revolvimento do solo. O compartimento orgânico parece se comportar como dreno de P quando o elemento apresenta altos teores no solo, e como fonte de P para as plantas em situações de deficiência.

Em relação ao fósforo inorgânico, alguns trabalhos mostram alteração deste compartimento em função do manejo do solo, enquanto outros relatam pouca ou nenhuma influência. Rheinheimer e Anghinoni (2001) estudaram a distribuição do fósforo inorgânico em solos com diferentes preparos e sucessões de cultura. As sucessões de cultura tiveram pouca influência nas frações de P inorgânico. Pavinato, Merlin e Rosolem (2009) estudaram a influência do preparo do solo sobre as frações de fósforo em solos de Cerrado e afirmaram que as frações lábeis de P no perfil do solo não foram afetadas pelos sistemas de manejo e não houve acúmulo de P disponível sob plantio direto.

Por outro lado, Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) mostraram que o teor de P orgânico em Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto diminuiu pela adição de superfosfato triplo e que o aumento no teor total de P no solo ocorreu em função do aumento do P inorgânico. Kolawole, Tijani-Eniola e Tian (2004) estudaram os efeitos da queima e incorporação superficial da cobertura morta após um ano de regeneração natural e o efeito da cobertura vegetal com *Pueraria sp.* nos períodos de pousio sobre frações de P no solo. A queima aumentou temporariamente as frações inorgânicas de P extraível com resina (63%) e NaOH (19%), quando comparada com a cobertura e com a incorporação. O P orgânico total diminuiu com o decorrer do experimento.

O fósforo inorgânico parece ser o compartimento mais dinâmico e o que melhor se correlaciona com o rendimento das culturas. Nziguheba, Merckx e Palm (2002) estudaram a dinâmica do fósforo do solo e a resposta do milho a diferentes doses de adubação fosfatada aplicada a um Argissolo Vermelho no oeste do Quênia. A fração de P inorgânico extraído por NaHCO_3 foi a mais afetada pelas mudanças no manejo, aumentando durante a fase de entrada e diminuindo após a interrupção da aplicação de P para todas as doses de P. Santos et al. (2008) também encontraram resultados que indicam que a adição de fosfatos ao solo alterou preferencialmente as frações inorgânicas de P.

Quanto à distribuição das frações inorgânicas no solo, Wright (2009) estudou os estoques de fósforo em solos cultivados com cana, gramado, pasto e sistemas florestais na Flórida, Estados Unidos. O fósforo ligado a Fe-Al representou em média 2,9% do P total para o gramado e floresta, 11,4% para a cana e 9,6% para a pastagem. A adubação do solo em longo prazo aumentou as frações inorgânicas. O P ligado ao Ca conteve 49% do P total da cana e 28% para outros usos da terra. Vale ressaltar que este trabalho foi realizado em solos calcáreos, sendo que o comportamento em Latossolos é bastante diferente. Em Latossolos, normalmente são encontrados maiores percentuais de P-Al e P-Fe,

como no trabalho de Teófilo e Frota (1982) que encontraram em média 44,24% de P-Al em três Latossolos Vermelho Distrófico incubados por 60 dias com 100 mg kg⁻¹ de KH₂PO₄.

De modo geral o fósforo inorgânico é influenciado pela textura do solo, pelas doses de fertilizantes aplicadas, pela mineralogia do solo, pelo sistema de preparo do solo e parece ser a forma que preferencialmente acumula o P após a aplicação de fertilizantes fosfatados.

2.2 Métodos de rotina para avaliação da disponibilidade de fósforo no solo

Na avaliação de métodos de extração do fósforo do solo, além dos aspectos químicos contemplados, é de importância decisiva verificar a eficiência do método para avaliar a disponibilidade de P para as plantas. Isso não quer dizer que os resultados determinados na análise química representem os teores disponíveis nos solos, mas que apresentem com eles a melhor correlação possível (RAIJ, 2010).

O mecanismo de ação dos extratores ácidos, como o Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) é baseado na manutenção de uma atividade do íon H⁺ na solução, em quantidade suficiente para a dissolução de formas inorgânicas de P associadas ao Ca (GONÇALVES; MEURER, 2009). Desse modo, o extrator Mehlich-1 pode superestimar o P disponível em solos com predomínio de P-Ca, seja em razão da gênese ou da utilização de fosfatos de baixa reatividade. Por outro lado, o extrator Mehlich-1, pode subestimar os valores de P disponível em solos argilosos, em especial aqueles com pH mais elevado (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Segundo Silva e Raij (1999) os extratores ácidos dissolvem predominantemente o P ligado ao Ca e quantidades menores de P ligado a Fe e Al, de modo que são menos indicados para solos de

regiões tropicais úmidas com predominância de caulinita, óxidos de ferro e de alumínio na fração argila.

O mecanismo de ação dos extratores constituídos por soluções diluídas de ácidos fracos como o extrator ácido cítrico ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ 2% p/p) envolve a formação de complexos entre os ânions orgânicos com os cátions da superfície do solo, para liberar o P para a solução, e a substituição do P adsorvido no solo pelos ânions orgânicos, para reduzir a readsorção por bloquear os sítios de adsorção (KAMPRATH; WATSON, 1980).

O mecanismo de ação dos extratores constituídos por soluções alcalinas tamponadas, como o Olsen ($NaHCO_3$ 0,5 N) é a liberação do P ligado a Fe e Al em pH elevado, o íon HCO_3^- substitui o P adsorvido no solo e reduz a atividade de Ca^{2+} em solução (OLSEN et al., 1954).

Segundo Raij (2010) a resina de troca iônica tem propriedades que permitem a avaliação apenas do fósforo lábil. O método de extração desenvolvido por Raij, Quaggio e Silva (1986) incorpora algumas otimizações na tentativa de resolver problemas de variabilidade de resultados obtidos por diferentes relações solo/resina. Raij, Quaggio e Silva (1986) propuseram que a resina aniônica deve ser saturada com bicarbonato de sódio a pH 8,5 e deve ser misturada com a resina catiônica para reduzir a força iônica e a concentração de íons divalentes na solução. No entanto, a aquisição de P na forma P-Ca por raízes de plantas que solubilizam essa forma de P pode fazer com que a resina trocadora de ânions subestime o P absorvido por essas plantas (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

Em solos sob plantio direto Bortolon, Schlindwein e Gianello (2009) encontraram altos coeficientes de correlação entre os métodos Mehlich-1 e resina, $r=0,80$ na profundidade de 0-10 cm e $r=0,94$ na profundidade de 10-20 cm. Moreira e Malavolta (2001) também observaram alta correlação entre os extratores Mehlich-1, Mehlich-3 e resina. Santos e Kliemann (2005)

encontraram o mesmo coeficiente de correlação para os teores de P extraídos por Mehlich-1, Mehlich-3 e resina e a produção de matéria seca da parte aérea do milho ($r=0,95$). Holanda et al. (1995) observaram as maiores correlações entre a produção de matéria seca e absorção de P pelo arroz para os extratores Bray-1 e resina. Segundo Silva et al. (1999) o método da resina, independentemente do tipo de solo e da fonte de P utilizada, apresentou as melhores correlações com a produção de matéria seca, P acumulado na parte aérea, altura das plantas e número de folhas trifolioladas do feijoeiro, mostrando-se mais adequado em estimar o P disponível.

2.3 Fosfato natural como fonte fósforo

Fosfatos naturais são concentrados apatíticos obtidos a partir de minérios fosfáticos ocorrentes em jazimentos localizados, os quais podem ou não, passar por processos físicos de concentração, como lavagem e/ou flotação, para separá-los de outros minerais com os quais estão misturados na jazida (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Os fosfatos naturais podem ser divididos em duas categorias: os fosfatos naturais “duros”, em que as apatitas não têm, ou têm muito poucas substituições isomórficas de fosfato por carbonato na rede cristalina, como são a maioria dos fosfatos naturais brasileiros; e os fosfatos naturais “moles”, de origem sedimentar, com alto grau de substituições isomórficas, resultando num cristal imperfeito, poroso e com baixa energia entrópica, podendo ser facilmente hidrolizados, por isso também são conhecidos como fosfatos naturais “reativos” (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

A maioria dos fosfatos naturais brasileiros de baixa reatividade (Araxá, Patos, Catalão, Abaeté, dentre outros) é de origem magmática, formados principalmente por apatitas, em geral com 4% a 5 % de P_2O_5 solúvel em ácido

cítrico e com teores de P_2O_5 total de 28 a 30% (GIRACCA; NUNES, 2009). Os fosfatos reativos comercializados no Brasil (Gafsa- Tunísia, Carolina do Norte-EUA, Marrocos, Jordânia, Arad-Israel, Djebel-Argélia, dentre outros) apresentam garantia mínima de 28% de P_2O_5 total e 9% de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico 2% (BRASIL, 1993, 1994a, b, 1995, 1997).

A utilização de fosfatos naturais, como possível fonte eficiente de P para as plantas é dependente de condições relacionadas à origem do fosfato, ao solo onde são aplicados e à planta cultivada (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Uma das condições favoráveis a solubilização dos fosfatos naturais é sua aplicação em solos ácidos (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996). Mas a acidez necessária para a dissolução do fosfato natural também pode ser suprida pela planta e pelos microrganismos rizosféricos (LIU et al., 2004).

Vários trabalhos de pesquisa estão sendo desenvolvidos no sentido de comparar a eficiência agrônômica dos fosfatos naturais, principalmente os reativos, em relação aos superfosfatos. Os resultados dos trabalhos têm conduzido à conclusão de que nos primeiros cultivos a eficiência dos fosfatos naturais é menor que a dos fosfatos solúveis, mas após os cultivos sucessivos a eficiência dos fosfatos naturais se equivale ou até supera a dos fosfatos solúveis. Oliveira Júnior, Prochnow e Klepker (2008) avaliaram a eficiência agrônômica do fosfato reativo de Arad em relação ao superfosfato triplo na cultura de soja. Quando aplicado a lanço, nos dois primeiros cultivos, o fosfato natural reativo Arad resultou em aproximadamente 76% de eficiência agrônômica relativa, o que demonstra média viabilidade agrônômica. Sob efeito residual, a aplicação localizada do superfosfato triplo resultou em resposta semelhante à verificada com a aplicação anual do fosfato reativo de Arad.

Guedes et al. (2009) avaliaram o crescimento de *Brachiara brizantha*, em função de doses de fosfato natural Arad na presença e ausência da calagem, bem como a eficiência agrônômica, em um Latossolo Amarelo sob pastagem

degradada da Amazônia. O fosfato natural de Arad foi mais eficiente para produção de massa seca do que o superfosfato triplo a partir do segundo corte da forrageira, com ou sem a correção do solo. Resende et al. (2006) compararam fertilizantes fosfatados em diferentes modos de aplicação, durante três cultivos sucessivos de milho, num Argissolo Vermelho do cerrado. Nas duas primeiras safras, as fontes de maior solubilidade (superfosfato triplo e termofosfato) ocasionaram maiores produções. No entanto, os fosfatos naturais (fosfato de Araxá e fosfato reativo de Arad) apresentaram melhor desempenho com o tempo, equiparando-se às fontes mais solúveis no terceiro cultivo.

Neste contexto, este trabalho pretende contribuir com informações para a compreensão da dinâmica do fósforo inorgânico proveniente de adubações com fosfatos reativos em Latossolos das regiões do Cerrado brasileiro e as relações que ocorrem com a textura, mineralogia e manejo destes solos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. F.; SANTOS JÚNIOR, J. D. Desenvolvimento e nutrição de milho em solo degradado biofertilizado com fosfato natural, enxofre e *Acidithiobacillus*. **Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 98-103, 2009.

BORTOLON, L.; SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Métodos de extração de fósforo e potássio no solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2400-2407, 2009.

BRASIL, E. C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, n. 4, p. 599-606, 1997.

BRASIL. Portaria n. 09, de 29 de janeiro de 1993. Estabelece as características e garantias mínimas do fertilizante Hiperfosfato Natural Reativo. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 3 fev. 1993. Disponível em: <[http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_9_93\[1\].pdf](http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_9_93[1].pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2011.

BRASIL. Portaria n. 19, de 30 de maio de 1997. Estabelece as características e garantias mínimas do fertilizante Fosfato Natural Reativo de Marrocos. 1997. Disponível em: <[http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_19_97\[1\].pdf](http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_19_97[1].pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2011.

BRASIL. Portaria n. 56, de 12 de maio de 1995. Estabelece as características e garantias mínimas do fertilizante Fosfato Natural Reativo de Al-Albiad/El-Hassa da Jordânia. 1995. Disponível em: <[http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_56_95\[1\].pdf](http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_56_95[1].pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2011.

BRASIL. Portaria n. 63, de 16 de março de 1994. Estabelece as características e garantias mínimas do fertilizante Fosfato Natural Reativo de Arad/Israel. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 21 mar. 1994a. Seção 1, p. 3936. Disponível em: <[http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_63_94\[1\].pdf](http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_63_94[1].pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2011.

BRASIL. Portaria n. 161, de 10 de outubro de 1994. Estabelece as características e garantias mínimas do fertilizante Fosfato Natural Reativo de Djebel Onk/Argélia. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 out. 1994b. Seção 1, p. 15459. Disponível em: <[http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_161_94\[1\].pdf](http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/arquivos/portarias/port_161_94[1].pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2011.

CARDOSO, I. M. et al. Analysis of phosphorus by (PNMR)-P-31 in Oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 112, n. 1/2, p. 51-70, 2003.

CERETTA, C. A. et al. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 6, p. 593-602, 2010.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 133-144, 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, MG, v. 27, n. 5, p. 896-900, 2003.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.

DAROUB, S. H.; PIERCE, F. J.; ELLIS, B. G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 170-176, 2000.

GIRACCA, E. M. N.; NUNES, J. L. da S. **Manejo de fertilizantes e corretivos agrícolas**. 2009. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/Manejo.aspx>>. Acesso em: 04 fev. 2011.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 357-362, 2009.

GUEDES, E. M. S. et al. Fosfato natural de arad e calagem e o crescimento de *Brachiaria brizanta* em Latossolo amarelo sob pastagem degradada na Amazônia. **Revista Ciências Agrárias**, Belém, n. 52, p. 117-129, jul./dez. 2009.

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

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Crawley, v. 237, n. 2, p. 173-195, 2001.

HOLANDA, J. S. de et al. Eficiência de extratores de fósforo para um solo adubado com fosfatos e cultivado com arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 561-568, 1995.

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

KAMPRATH, E. J.; WATSON, M. E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLES, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 433-469.

KOLAWOLE, G. O.; TIAN, G.; TIJANI-ENIOLA, H. Dynamics of phosphorus fractions during fallow with natural vegetation and planted *Pueraria phaseoloides* in South-Western Nigeria. **Plant and Soil**, Crawley, v. 257, n. 1, p. 63-70, 2003.

KOLAWOLE, G. O.; TIJANI-ENIOLA, H.; TIAN, G. Phosphorus fractions in fallow systems of West Africa: effect of residue management. **Plant and Soil**, Crawley, v. 263, n. 1/2, p. 113-120, 2004.

LIU, Q. et al. The mobilisation and fate of soil and rock phosphate in the rhizosphere of ectomycorrhizal *Pinus radiata* seedlings in an allophonic soil. **Plant and Soil**, Crawley, v. 264, n. 1, p. 219-229, 2004.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas**: aspectos agronômicos. 3. ed. São Paulo: ANDA, 2000. 72 p.

LYNCH, J. P.; BEEBE, S. E. Adaptation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to low phosphorus availability. **Horticultural Science**, Slezská, v. 30, p. 1165-1171, Oct. 1995.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1519-1527, 2001.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 471-550.

NZIGUHEBA, G.; MERCKX, R.; PALM, C. A. Soil phosphorus dynamics and maize response to different rates of phosphorus fertilizer applied to an Acrisol in Western Kenya. **Plant and Soil**, Crawley, v. 243, n. 1, p. 1-10, 2002.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 5, p. 623-631, 2008.

OLSEN, S. R. et al. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington: USDA, 1954. 22 p.

PARTELLI, F. L. P. et al. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 7, p. 2065-2072, 2009.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in brazilian cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009.

RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, Crawley, v. 274, n. 1/2, p. 37-49, 2005.

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, J. H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 57, n. 3, p. 77-159, 1996.

RAIJ, B. Fertilidade do solo no Brasil: contribuições do Instituto Agronômico de Campinas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 132, p. 1-13, dez. 2010. Disponível em: <[http://www.ipni.net/ppiweb/BRAZIL.NSF/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/5dabcfb5dec4ed0e832577720050ce6c/\\$FILE/page1-13-132.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/BRAZIL.NSF/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/5dabcfb5dec4ed0e832577720050ce6c/$FILE/page1-13-132.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2011.

RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. da. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 17, n. 5, p. 547-566, 1986.

RESENDE, A. V. de et al. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 3, p. 453-466, 2006.

RESENDE, A. V. de; FURTINI NETO, A. E. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 32 p.

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

SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O. et al. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS, 1999. p. 267-319.

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, E. de A.; KLIEMANN, J. H. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 3, p. 139-146, 2005.

SANTOS, J. Z. L. **Adubação fosfatada, frações de fósforo e resposta do feijoeiro, em Latossolos de cerrado, com diferentes textura, mineralogia e histórico de uso.** 2008. 87 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)– Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SHANE, M. W.; LAMBERS, H. Cluster roots: a curiosity in context. **Plant and Soil**, Crawley, v. 274, n. 1/2, p. 101-125, 2005.

SILVA, F. C. da; RAIJ, B. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SILVA, W. M. et al. Eficiência de extratores de fósforo em dois Latossolos do Mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2277-2285, 1999.

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.
Disponível em: <[http://www.potafos.org/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/\\$FILE/Encarte102.pdf](http://www.potafos.org/ppiweb/brazil.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/7759ddc6878ca7eb83256d05004c6dd1/$FILE/Encarte102.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2010.

TEÓFILO, F. H. P.; FROTA, J. N. E. Formas de fósforo e sua disponibilidade em solos da região da Ibiapaba-CE. **Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 61-69, 1982.

VACCARI, D. A. Phosphorus: a looming crisis. **Scientific American**, New York, v. 300, n. 6, p. 54-59, 2009.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Cambridge, v. 157, n. 3, p. 423-447, 2003.

WRIGHT, A. L. Soil phosphorus stocks and distribution in chemical fractions for long-term sugarcane, pasture, turfgrass, and forest systems in Florida. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 83, n. 3, p. 223-231, 2009.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 70-77, 2008.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolo
com diferentes históricos de uso, adubado com fosfato reativo**

RESUMO

O P inorgânico do solo pode ser encontrado em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos, sendo que essa dinâmica influencia a disponibilidade do P para as plantas. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nas frações inorgânicas de P em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) após a aplicação de diferentes doses de fosfato natural reativo. Foram adicionadas doses de P equivalentes a 0, 120, 240 e 480 mg dm⁻³ em um LVd com dois históricos de uso: solo cultivado por dez anos em sistema de plantio direto e solo não cultivado anteriormente. A fonte de fósforo utilizada foi o fosfato reativo de Arad. Trinta dias após a aplicação dos tratamentos o solo foi cultivado com feijoeiro. As frações inorgânicas de fósforo ligadas a Al, Fe e Ca e o P disponível pelos extratores de Mehlich-1, resina trocadora de íons, ácido cítrico e Olsen foram determinados antes e após o cultivo do feijoeiro. A aplicação do fosfato natural reativo aumenta os teores de fósforo ligado a cálcio, a ferro e a alumínio no LVd. Após solubilização, o fósforo da fração P-Ca é mobilizado para as frações P-Al e P-Fe. As principais formas de acúmulo de fósforo inorgânico no LVd são P-Al e P-Fe. A fração P-Al apresenta estreitas correlações com os teores de P disponível avaliado por diferentes métodos. Extratores alcalinos, como o extrator Olsen, podem ser uma boa alternativa para determinar os teores de P disponível no LVd com histórico de uso sob plantio direto, por liberarem as formas de P-Al e P-Fe, que representam as principais formas de acúmulo de P inorgânico nestes sistemas.

Palavras-chave: Adubação fosfatada. Fracionamento de P. Acúmulo de fósforo no solo.

ABSTRACT

Soil inorganic P can be found bonded to Fe, Al, Ca, silicate clays and oxides, and that dynamic influences P availability to the plants. The objective of this paper was to evaluate changes in inorganic P fractions in a Dystrophic Red Oxisol (LVd) after different doses of reactive phosphate rock application. Doses of P equivalent to 0, 120, 240 and 480 mg dm⁻³ were added to a LVd with two usage histories: soil cultivated for ten years in no-tillage system and previously uncultivated soil. The phosphorus source used was Arad phosphate rock. Thirty days after treatments application the soil was cultivated with bean. Phosphorus inorganic fractions bonded to Al, Fe and Ca and available P by Mehlich-1, resin ion exchange, citric acid and Olsen extractors were determined in soil before and after bean plant cultivation. The reactive phosphate rock application increases the contents of phosphorus bonded to calcium, iron and to aluminum in LVd. After solubilization, P-Ca fraction was mobilized to P-Al and P-Fe fractions. The main forms of inorganic phosphorus accumulation in LVd were P-Al and P-Fe. The P-Al fraction presented close correlations to available P contents appraised by different methods. Alkaline extractors, such as Olsen extractor, can be a good alternative to determinate available P contents in LVd with no-tillage usage historic, as they release P-Al and P-Fe forms that represent the main inorganic P forms accumulation in these systems.

Keywords: Phosphate fertilization, P fractionation, soil phosphorus accumulation.

1 INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade de fósforo é considerada a principal limitação da produção agrícola em condições úmidas, tropicais e subtropicais (HINSINGUER, 2001). Com a adição de fertilizantes fosfatados ao solo, ocorre o acúmulo de P em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, no entanto o acúmulo é mais pronunciado nas formas inorgânicas (GATIBONI et al., 2008; PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

O P inorgânico do solo pode ser encontrado em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos, (GATIBONI; KAMINSKI; RHEINHEIMER, 2005), sendo que essa dinâmica no solo controla a disponibilidade do fósforo para as plantas. O fósforo, adsorvido ou precipitado com Ca, Fe e Al é estável nos solos, o que leva à fixação, mas estas formas podem ser suscetíveis a dissolução e regeneração pela mudança no uso da terra ou das condições ambientais (WRIGHT, 2009).

Cardoso et al. (2003) sugeriram que sistemas agroflorestais influenciam a dinâmica do P através da conversão de parte do P inorgânico em P orgânico e mantêm maiores frações de P disponível para as culturas agrícolas. No entanto, sob sistema convencional ou plantio direto, as frações lábeis de P não foram afetadas pelos sistemas de manejo em solos de cerrado (PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009).

Li et al. (2008) estudaram a dinâmica das frações de fósforo na rizosfera de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) e de trigo (*Triticum durum turgidum L.*) cultivados em monocultivo e consorciados. Estas culturas apresentaram comportamentos diferentes na dinâmica do P, a fração de fósforo inorgânico extraída por NaHCO_3 que representa o P lábil, foi significativamente maior na rizosfera de monocultivos de feijão do que em monocultivos de trigo, o que

indica que espécies vegetais diferentes podem ter diferentes capacidades para acessar as formas de fósforo no solo.

A compreensão do modo de ocorrência do fósforo inorgânico nos solos certamente trará novas informações que poderão subsidiar o desenvolvimento de métodos de extração de P disponíveis ou a inclusão de novas variáveis na interpretação dos teores extraídos, o que pode fornecer bons resultados para o aperfeiçoamento da recomendação de adubação fosfatada em áreas onde se aplica fosfato natural. O presente estudo objetiva avaliar as formas inorgânicas de acumulação de fósforo em um Latossolo Vermelho Distrófico após aplicação de fosfato natural reativo e as alterações que ocorrem no sistema após o cultivo do feijoeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. As amostras de solo foram coletadas na Fazenda Alto Alegre, localizada no município de Planaltina de Goiás - GO, situada a 15° 20' 04'' de latitude sul e 47° 34' 42'' de longitude oeste, na profundidade de 0-20 cm, sob condição de vegetação nativa (solo não cultivado) e sob condição de cultivo em sistema de plantio direto, por sucessão soja e milho durante dez anos. A área cultivada recebia anualmente 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e no ano de 2000 recebeu uma adubação fosfatada corretiva com 650 kg ha⁻¹ de fosfato natural de Gafsa (28% de P₂O₅ total).

As amostras foram caracterizadas em relação aos seus atributos, conforme método descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1997) e Resende, Bahia Filho e Braga (1987) (Tabela 1). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) com textura argilosa.

Tabela 1 Atributos químicos, físicos e mineralógicos relacionados à disponibilidade de fósforo no LVd, antes da aplicação dos tratamentos

Solos	Uso	pH H ₂ O	P- Mehlich-1	P-resina	P-rem	CMAP	K
mg dm ⁻³							
LVd	SNC	5,5	1,0	3,6	9,8	1139	43
	SC	5,7	11,6	37,0	14,6	994	123
g kg ⁻¹							
LVd	SNC	32	570	203,1	115,9	4,7	35,1
	SC	28	570	242,0	111,7	4,7	34,1

SNC: solo não cultivado anteriormente; SC: solo cultivado. P-rem: fósforo remanescente; CMAP: capacidade máxima de adsorção de fósforo; MO: matéria orgânica; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Hm: hematita; Gt: goethita.

O experimento foi realizado em vasos com capacidade para quatro dm^3 de solo. Foram aplicadas quatro doses de P (0, 120, 240 e 480 mg dm^{-3}) no LVd com histórico de cultivo anterior sob sistema de plantio direto (SC) e no LVd não cultivado anteriormente (SNC). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial (4 x 2), com quatro repetições. O fornecimento das doses de P foi realizado com base no teor total de P_2O_5 do fosfato reativo de Arad (30%).

As amostras receberam carbonato de cálcio e carbonato de magnésio p.a., buscando elevar a saturação por bases para 70% e uma adubação de plantio com reagentes p.a constituída por: 100 mg de N; 100 mg de K no solo não cultivado e 30 mg no solo cultivado; 40 mg de S; 0,8 mg de B; 1,5 mg de Cu; 3,6 mg de Mn; 5,0 mg de Zn; 0,15 mg de Mo por dm^3 de solo e a dose de P correspondente a cada tratamento. Após 30 dias de incubação com umidade controlada diariamente para 60% do volume total de poros ocupados por água foram coletadas amostras dos solos para análise dos seus atributos químicos (Tabela 2, Tabelas 1A e 2A).

Procedeu-se a semeadura de seis sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Jalo Radiante) por vaso. Aos 12 dias após o plantio foram efetuados desbastes deixando-se três plantas de feijoeiro por vaso. As adubações de cobertura com N e K foram realizadas de acordo com o crescimento das plantas. Os tratamentos referentes aos solos cultivados receberam 300 mg de N e 150 mg de K por dm^{-3} , enquanto os tratamentos nos solos não cultivados receberam 300 mg de N e 300 mg de K por dm^{-3} parcelados em três aplicações. Durante toda a condução do experimento, a umidade foi mantida em 60% do volume total de poros pela adição de água deionizada. Após o cultivo do feijoeiro foram obtidas amostras de solo de cada vaso para análise química (Tabela 2, Tabelas 1A e 2A). As plantas colhidas foram secas em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 60° C, sendo posteriormente pesadas para a obtenção da matéria

seca da parte aérea, trituradas e submetidas à análise química para determinação dos teores totais de P (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

As amostras de solo obtidas após a aplicação dos tratamentos e após o cultivo do feijoeiro foram submetidas à extração sequencial do fósforo inorgânico. O fósforo ligado ao alumínio (P-Al) foi extraído através da solução de fluoreto amônio (NH_4F 0,5M a pH 8,2), o fósforo ligado ao ferro (P-Fe) através da solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,1 M) e o fósforo ligado ao cálcio (P-Ca) pela solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 0,25M) (CHANG; JACKSON, 1957). As amostras ainda foram analisadas pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) (MEHLICH, 1953), resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987), ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 2% p/p) (modificado de DYER, 1894) e Olsen (NaHCO_3 0,5 M) (OLSEN et al., 1954).

A determinação dos teores de fósforo nos extratos foi realizada por espectrofotometria, conforme Murphy e Riley (1962), sendo que o método consiste na formação do complexo fosfomolibdico de cor azul em meio sulfúrico com ácido ascórbico como redutor. Foram preparadas soluções de referência para obtenção de curvas analíticas, através da diluição serial da solução padrão de concentração 1000 mg L^{-1} de P.

Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância e correlação de Pearson. Também foram ajustadas equações de regressão para as diferentes frações de P nos solos em função das doses de P aplicadas. Para identificar os principais fatores que explicam as correlações entre o conjunto dos extratores químicos e das formas inorgânicas de fósforo, verificadas através dos coeficientes de Pearson, foi gerada uma matriz de dados com as variáveis P-Al, P-Fe, P-Ca e P disponível pelos extratores de Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico 2% e Olsen para a análise de componentes principais.

A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para obter uma transformação mais representativa e compacta das observações. Os componentes

são individualmente responsáveis pela variância dos dados. Geralmente a maior parte da variância pode ser explicada por um número reduzido de componentes, sendo possível o descarte do restante sem perda significativa de informação. Os elementos de transformação das novas variáveis são chamados de escores.

Todas as operações matemáticas e estatísticas foram realizadas com auxílio dos programas Sisvar (FERREIRA, 2000) e SPSS 15.0 (*Statistical Package for Social Sciences*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa entre o histórico de uso e as doses de P aplicadas sobre os teores de P disponível pelos extratores, Mehlich-1, ácido cítrico 2% e Olsen, antes do cultivo do feijoeiro (Tabela 3A). Depois do cultivo, houve interação (histórico de uso x doses de P aplicadas) para os extratores resina de troca iônica e ácido cítrico 2% (Tabela 4A). Observa-se que o solo cultivado por dez anos em plantio direto apresentou maiores teores de P disponível pelos diferentes extratores que o solo cultivado pela primeira vez (Tabela 2). Essa maior disponibilização de P no solo cultivado anteriormente pode ser devido à adsorção específica dos grupos fosfatos, provenientes das primeiras adubações, com as cargas positivas dos óxidos de Al e Fe, o que pode ter reduzido a quantidade de cargas positivas (ALLEONI; MELLO; ROCHA, 2009) e a adsorção do fósforo aplicado posteriormente.

Houve efeito significativo da adição de doses de P sobre os teores de P-Al e P-Fe, com interação dose x histórico significativa apenas para os teores de P-Al (Tabelas 5A e 6A). As concentrações médias das frações de P ligadas ao Al e ao Fe diferiram significativamente no LVd sob efeito dos dois históricos de uso. O solo anteriormente cultivado apresentou maiores teores de fósforo ligado ao Al e ao Fe que o solo não cultivado. Esses resultados discordam daqueles encontrados por Silva et al. (2003) que encontraram maiores teores de P-Al e P-Fe em Latossolo Vermelho Distroférico não cultivado do que no mesmo solo cultivado anteriormente.

Foram geradas equações de regressão polinomial para avaliar o comportamento de cada fração, sendo que antes do cultivo do feijoeiro os teores de P-Al aumentaram linearmente com as doses de P aplicadas no solo (Figura 1a).

Tabela 2 Fósforo disponível por diferentes extratores em Latossolo Vermelho Distrófico cultivado por dez anos em plantio direto e não cultivado anteriormente, 30 dias após a aplicação dos tratamentos (antes do plantio do feijoeiro) e depois do plantio do feijoeiro

		Doses de P (mg dm ⁻³)				Equações	R ²
		0	120	240	480		
		P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)					
Antes	Não cultivado	1,00	21,75	70,00	128,00	Y=0,2738**x-2,30	0,99
	Cultivado	10,00	40,00	80,25	170,00	Y=0,000186** x ² +0,2456**x+9,41	0,99
Depois	Não cultivado	0,88	17,73	68,97	109,9	Y=0,2549**x+3,35	0,98
	Cultivado	9,83	33,75	76,77	137,33		
		P-Resina (mg dm ⁻³)					
Antes	Não cultivado	1,00	39,25	84,00	120,00	Y=-0,000298**x ² +0,3944**x+16,28	0,99
	Cultivado	32,00	78,25	104,50	154,00		
Depois	Não cultivado	4,93	31,17	70,03	97,90	Y=-0,000254**x ² +0,3222**x+2,54	0,98
	Cultivado	29,20	53,10	75,63	116,37	Y=0,1808**x+30,61	0,99
		P-Ácido cítrico (mg dm ⁻³)					
Antes	Não cultivado	4,25	30,25	76,25	211,75	Y=0,000564** x ² + 0,1627**x+3,80	0,99
	Cultivado	7,25	48,25	111,75	192,50	Y=0,3925**x+7,50	0,99
Depois	Não cultivado	6,75	29,00	86,75	202,75	Y=0,000396** x ² + 0,2262**x+3,85	0,99
	Cultivado	8,50	29,25	66,75	182,00	Y=0,000503**x ² +0,1209**x+8,23	0,99
		P- Olsen (mg dm ⁻³)					
Antes	Não cultivado	3,19	3,86	4,14	3,79	Y=-0,000011 ^{ns} x ² + 0,0067*x+3,20	0,99
	Cultivado	12,73	12,23	14,39	15,47	Y=0,0066**x+12,31**	0,98
Depois	Não cultivado	5,33	6,81	8,47	11,02	Y=-0,000025*x ² +0,0252**x+12,39	0,99
	Cultivado	19,69	22,63	26,03	26,30		

Após o cultivo do feijoeiro, no solo não cultivado anteriormente, os incrementos dos teores de P-Al também apresentaram comportamento linear com as doses de P aplicadas, mas houve aumento do coeficiente angular da reta, indicando que a planta tem influência nos teores de P inorgânico, provavelmente pelo efeito da exsudação de ácidos orgânicos pela rizosfera (HARTWIG et al., 2007). No solo cultivado anteriormente o comportamento foi quadrático, mas com a mesma tendência de maiores teores de P-Al, indicando efeitos da planta e/ou do tempo de reação para solubilização do fosfato reativo aplicado.

Os teores de P-Fe diferiram com os históricos de uso e doses de P aplicadas, sem efeito significativo da interação dose x histórico de uso, sendo também possível verificar aumento do coeficiente angular da equação linear após o cultivo do feijoeiro (Figura 1b). O solo com histórico de uso em plantio direto apresentou maiores teores de P-Fe independente da dose de P aplicada, com um teor médio de P-Fe igual a 141,31 mg kg⁻¹, enquanto o solo não cultivado anteriormente apresentou teor médio igual a 73,00 mg kg⁻¹.

Para a fração P-Ca não houve diferença entre o solo com histórico de cultivo sob plantio direto e o solo sem cultivo anterior (Tabelas 5A e 6A). Provavelmente, o fosfato reativo de Gafsa aplicado na área sob plantio direto no ano de 2000 foi solubilizado e armazenado nas formas P-Al e P-Fe. Isso indica que nas condições de cerrado o fósforo não é armazenado na forma P-Ca. Houve efeito das doses de P aplicadas sobre os teores de P-Ca, o que está relacionado à composição da fonte de P aplicada (Figura 1c). Os teores de P-Ca apresentaram comportamento quadrático em função das doses de P aplicadas, com valor máximo de 70,6 mg kg⁻¹ de P-Ca na dose 352 mg kg⁻¹ de P aplicado ao solo. Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) encontraram comportamento linear no P extraído por HCl, fração que equivale ao P-Ca pelo método de Hedley et al. (1982), e atribuíram o aumento de P à saturação superficial dos sítios de adsorção.

A análise da dinâmica do fósforo inorgânico em valores percentuais permite verificar a magnitude das alterações ocorridas (Figura 2). A fração P-Fe foi dominante na dose zero, o que está relacionado aos altos teores de goethita e hematita do solo (Tabela 1) em comparação a outros Latossolos da região. Antes do cultivo do feijoeiro, a fração P-Fe representou 72% do fósforo inorgânico total do solo e após o cultivo o P-Fe diminuiu para 64% no solo não cultivado anteriormente. No solo cultivado anteriormente, o P-Fe representou 57% do fósforo inorgânico total e não variou percentualmente após o cultivo do feijoeiro.

Ao aplicar o fertilizante fosfatado natural reativo, houve alteração na distribuição percentual das frações de fósforo. A fração P-Fe diminuiu percentualmente em relação ao P inorgânico total, que possivelmente tem preferência nas ligações mantendo em torno de 45% do fósforo inorgânico total em seu compartimento. A fração P-Ca que inicialmente apresentou a menor participação percentual (8%) aumentou bruscamente com a adição de 120 mg dm^{-3} de P, e passou a representar 40% do fósforo inorgânico total no solo não cultivado e 27% no solo cultivado anteriormente. A menor variação percentual de P-Ca no solo com histórico de cultivo sob SPD mostra maior capacidade de transferência do fósforo do compartimento P-Ca para outras frações.

O percentual de P-Ca com a aplicação de maiores quantidades de P (240 e 480 mg dm^{-3} de P), se manteve entre 25-35% no solo não cultivado anteriormente e entre 15-20% no solo cultivado anteriormente. Não se observa a continuação da tendência de acúmulo percentual de P-Ca nas maiores doses de P aplicadas, o que está de acordo com a Figura 1c, onde a fração P-Ca apresenta um modelo quadrático. A menor variação percentual do P-Ca com a aplicação das maiores doses de P sugere que as plantas atingiram sua capacidade máxima de drenar Ca com as maiores doses do fosfato reativo. Além disso, parte no P-Ca dissolvido pode estar sendo acumulado em outras frações.

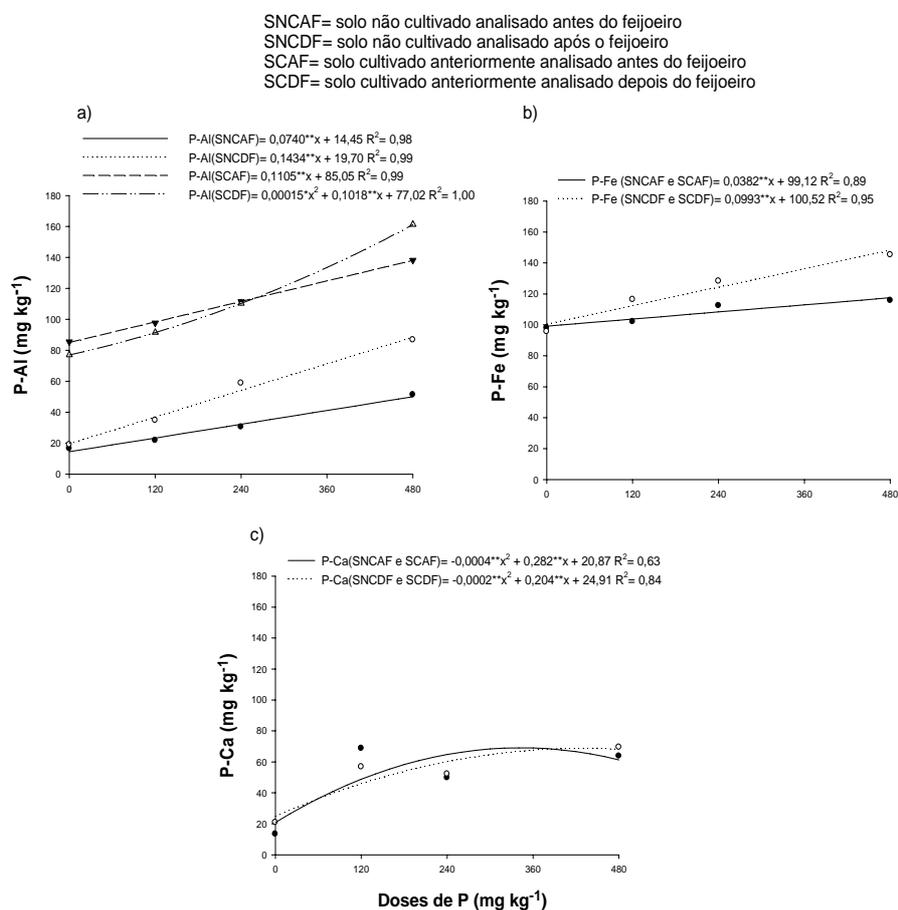


Figura 1 Concentrações de P-Al (a), P-Fe (b) e P-Ca (c) no Latossolo Vermelho Distrófico não cultivado anteriormente e cultivado por dez anos em plantio direto em função das doses de P aplicadas

O comportamento do fósforo antes e depois do cultivo do feijoeiro permite afirmar que a fração P-Al aumenta gradativamente em detrimento da fração P-Ca, independentemente do histórico de uso, o que indica que a planta absorveu P-Ca ou auxiliou em sua solubilização e favoreceu o armazenamento na fração P-Al (Figuras 2 a, 2b). O aumento percentual de P-Al provavelmente

está associado aos elevados teores de gibbsita do LVd que está em torno de 110 g kg^{-1} de solo (Tabela 1). Esses resultados também confirmam as equações de estabilidade para fosfatos de Al, Fe e Ca, descritas em Mello e Perez (2009), que afirmaram que em solos ácidos espera-se que os fosfatos de Ca aplicados nos solos, como fertilizantes, aumentem a disponibilidade de P em curto prazo, mas com o tempo se convertam em formas ligadas a Al e Fe.

No solo não cultivado anteriormente, observa-se um aumento percentual da fração P-Al após o cultivo do feijoeiro (Figura 2a), mas no solo cultivado anteriormente sob plantio direto, independentemente da dose de aplicada o percentual da fração P-Al se manteve entre 30-40% do fósforo inorgânico total, antes e depois do cultivo do feijoeiro. Os resultados indicam que a variação do percentual das frações P-Al, P-Fe e P-Ca no solo cultivado anteriormente é bem menor que no solo não cultivado, o que mostra que há um ponto de estabilização percentual das três frações com os cultivos sucessivos. A condição que parece ser a de maior estabilidade para a distribuição percentual das frações de fósforo no LVd adubado com fosfato natural reativo, está em torno de 45% P-Fe, 40% P-Al e 15% P-Ca (Figura 2b). Teófilo e Frota (1982) encontraram em média 44,24% de P-Al em três Latossolos Vermelho Distrófico incubados por 60 dias com 100 mg kg^{-1} de KH_2PO_4 .

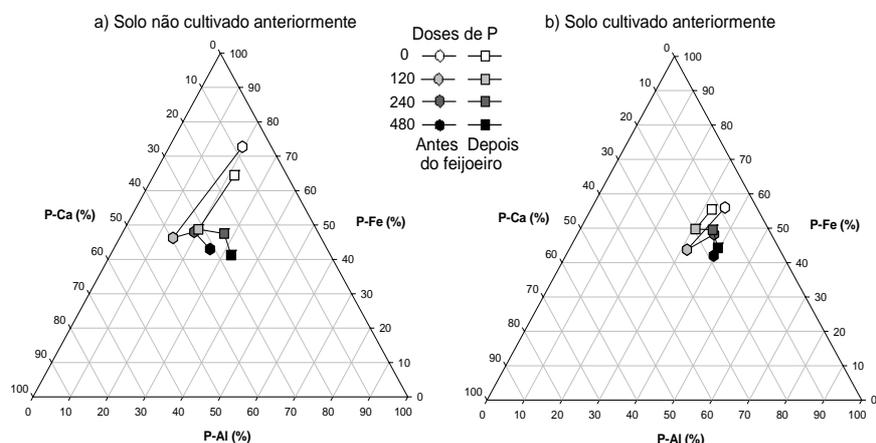


Figura 2 Valores percentuais de P-Al, P-Fe, P-Ca em relação ao P inorgânico total (\sum P-Al; P-Fe; P-Ca) no LVd não cultivado (a) e no LVd cultivado por dez anos em sistema de plantio direto (b) antes e depois do experimento

3.1 Correlações entre as frações inorgânicas de P, métodos de avaliação da disponibilidade de P e parâmetros de aproveitamento de P pelo feijoeiro

O fracionamento de fósforo no solo tem sido comumente realizado para caracterizar os efeitos dos tipos de solos e fontes de fósforo, na potencial disponibilidade, mobilidade e no destino do P aplicado aos solos (MOSTASHARI et al., 2008). Os resultados de correlações entre as frações inorgânicas de P e os métodos de avaliação de sua disponibilidade podem mostrar que os extratores de rotina têm preferência na extração de determinadas formas de fósforo em função do mecanismo de ação química do extrator.

As correlações de Pearson entre as frações inorgânicas de P, métodos de extração de fósforo disponível e as variáveis de absorção e utilização do fósforo pela planta do feijoeiro estão representadas na Tabela 3.

Pode-se observar que os extratores Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico e Olsen apresentaram estreitas relações com a fração P-Al no solo cultivado anteriormente, o que indica que essa fração é a principal responsável pela disponibilidade de P nessa condição. No solo não cultivado os extratores apresentaram os maiores coeficientes de correlação com as frações P-Al e P-Fe, o que sugere que nas primeiras adubações o P disponível é oriundo principalmente das duas frações.

O extrator Mehlich-1 apresentou maiores coeficientes de correlação com as frações P-Al e P-Fe do que com a fração P-Ca. Esperava-se que os extratores constituídos pelas soluções ácidas apresentassem maiores coeficientes de correlação com a fração P-Ca, conforme resultado encontrado por Rocha et al. (2005) no qual o coeficiente de correlação entre P extraído por Mehlich-1 e P-Ca foi de $r=0,83$. Kaleeswari et al. (2007) também encontraram maiores coeficientes de correlação entre a fração P-Fe e os teores de fósforo extraídos por Mehlich-1, do que entre a fração P-Ca x P-Mehlich-1, em Planossolos da Índia.

Os métodos de determinação do P disponível apresentaram estreitas correlações entre si, sendo os pares Mehlich-1 x resina ($r \geq 0,95$), Mehlich-1 x ácido cítrico ($r \geq 0,98$), resina x ácido cítrico ($r \geq 0,92$). No solo não cultivado anteriormente os métodos Mehlich-1, resina, ácido cítrico e Olsen apresentaram altos coeficientes de correlação com a matéria seca da parte aérea, matéria seca dos grãos e fósforo acumulado até o florescimento. Santos e Kliemann (2005) também encontraram correlações altas e significativas nos coeficientes de correlação entre os métodos Mehlich-1, Mehlich-3, resina e a produção de matéria seca de milho, em solos adubados com superfosfato triplo e fosfatos de Arad, Araxá e Phospal.

Tabela 3 Correlação entre as frações inorgânicas de fósforo, P disponível por diferentes métodos e parâmetros de aproveitamento do P pelo feijoeiro, no LVd, não cultivado e cultivado anteriormente, antes (AF) e depois do cultivo (DF)

		P-Al	P-Fe	P-Ca	Mehlich-1	Resina	Cítrico	Olsen
Solo Não cultivado anteriormente								
Mehlich-1	AF	0,97**	0,92**	0,60*	1,00			
	DF	0,98**	0,88**	0,71**	1,00			
Resina	AF	0,92**	0,94**	0,71**	0,97**	1,00		
	DF	0,97**	0,93**	0,81**	0,95**	1,00		
Ácido Cítrico	AF	0,98**	0,87**	0,54*	0,98**	0,92**	1,00	
	DF	0,97**	0,85**	0,70**	0,99**	0,93**	1,00	
Olsen	AF	0,30	0,42	0,52*	0,36	0,49	0,28	1,00
	DF	0,96**	0,90**	0,76**	0,97**	0,94**	0,95**	1,00
MSPA	AF	0,72**	0,88**	0,63**	0,81**	0,85**	0,75**	0,31
	DF	0,83**	0,88**	0,78**	0,80**	0,80**	0,77**	0,78**
P Acum.	AF	0,77**	0,82**	0,79**	0,83**	0,90**	0,74**	0,61*
	DF	0,86**	0,96**	0,83**	0,80**	0,90**	0,77**	0,82**
MSG	AF	0,70**	0,87**	0,61*	0,80**	0,84**	0,72**	0,34
	DF	0,81**	0,88**	0,78**	0,78**	0,79**	0,75**	0,76**
Solo cultivado anteriormente								
Mehlich-1	AF	0,97**	0,33	0,40	1,00			
	DF	0,97**	0,76**	0,65**	1,00			
Resina	AF	0,94**	0,38	0,52*	0,96**	1,00		
	DF	0,95**	0,76**	0,68**	0,99**	1,00		
ácido cítrico	AF	0,96**	0,35	0,40	0,98**	0,97**	1,00	
	DF	0,97**	0,73**	0,62*	0,98**	0,96**	1,00	
Olsen	AF	0,71**	0,26	0,06	0,80**	0,73**	0,80**	1,00
	DF	0,71**	0,54*	0,46	0,77**	0,75**	0,70**	1,00
MSPA	AF	0,12	0,15	-0,05	0,22	0,20	0,22	0,17
	DF	0,21	0,36	0,03	0,22	0,22	0,18	0,02
P Acum.	AF	0,77**	0,38	0,16	0,78**	0,73**	0,79**	0,70**
	DF	0,79**	0,61*	0,49	0,80**	0,78**	0,71**	0,61*
MSG	AF	0,09	0,20	-0,05	0,17	0,15	0,18	0,15
	DF	0,15	0,32	-0,08	0,19	0,19	0,15	-0,02

MSPA: matéria da parte aérea; PAcum.: Fósforo acumulado até o florescimento; MSG matéria seca dos grãos de feijão.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste t de Student.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste t de Student.

As correlações dos teores de P-Ca com os teores extraídos por Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico e Olsen aumentaram significativamente na avaliação realizada depois do cultivo do feijoeiro (DF), o que sugere também um papel da planta na solubilização dos fosfatos menos solúveis, sendo que a quantificação da magnitude deste efeito não foi objetivo do presente trabalho.

No solo não cultivado anteriormente, as frações P-Al, P-Fe e P-Ca apresentaram correlações positivas e significativas com a matéria seca da parte aérea, com o fósforo acumulado pelo feijoeiro até o florescimento e com a matéria seca dos grãos. Mas, no solo cultivado anteriormente, a matéria seca da parte aérea e a matéria seca dos grãos não se correlacionaram com nenhuma das frações inorgânicas de P, nem com os teores de P disponível pelos extratores, o que mostra que não houve resposta do feijoeiro à aplicação do fosfato natural reativo no solo com histórico de uso sob plantio direto, provavelmente em função dos altos teores de P disponível antes da aplicação dos tratamentos (Tabela 1). Isso mostra a possibilidade de diminuição das doses de P aplicadas em áreas cultivadas em sistema de plantio direto, que receberam adubações fosfatadas por muitos anos.

3.2 Análise de componentes principais das frações inorgânicas de P e métodos de avaliação de sua disponibilidade

Foram selecionados dois componentes principais derivados por rotação varimax, onde o primeiro componente concentrou 63,38% da variância total e o segundo 24,86%, acumulando 88,24%. Segundo Ferreira (1996) se uma porcentagem de 70% ou mais da variância total for atribuída aos primeiros componentes principais, esses podem substituir as variáveis originais sem perda demasiada de informações.

A distribuição das amostras de solo em relação aos componentes 1 e 2 é representada na Figura 3. Observa-se claramente no componente principal 1 (CP1), que as amostras foram distribuídas em função das doses de P aplicadas. Como o CP1 explica 63,38 % da variância total dos teores de fósforo, essa variância é atribuída às doses de P aplicadas ao solo.

Nota-se que o primeiro grupo é influenciado pelos valores positivos dos fatores P-Al, P-Fe e P extraído pela solução de Olsen, indicando que os extratores alcalinos puderam revelar a presença de P não associado às doses do fosfato aplicadas em curto prazo, como fosfato reativo de Arad. O P extraído por este extrator estava relacionado ao armazenamento devido às aplicações anteriores ao experimento (Figuras 3a, 3b). Isso reafirma que há uma tendência de acúmulo de fósforo ligado ao Al e ao Fe no LVd, conforme mostrado na Figura 2.

Segundo Silva e Raij (1999) o princípio do método de Olsen é a liberação do P ligado a Fe e Al, pois em pH elevado o íon HCO_3^- atua substituindo o P adsorvido no solo e reduzindo a atividade de Ca^{2+} em solução. Isso explicaria porque o P-Olsen influenciou a dispersão das amostras de solo no mesmo sentido que P-Al e P-Fe.

O gráfico de loadings (Figura 3a) permite a caracterização das tendências entre as variáveis. Observa-se que os métodos de extração de P disponível influenciaram na dispersão das amostras de solo (Figura 3b) em função da natureza química do extrator. Os extratores que agem através de meio ácido e a resina de troca iônica influenciaram diretamente os valores positivos do CP1 que distingue as doses de P aplicadas ao solo. Os extratores alcalinos ou P-Al, P-Fe e P disponível por Olsen influenciaram os valores positivos do CP2 que distingue os dois históricos de uso do solo. Desta forma, a análise de componentes principais juntamente com o fracionamento de P inorgânico

puderam revelar a origem e o destino do fósforo adicionado ao Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa na forma de fosfato natural reativo.

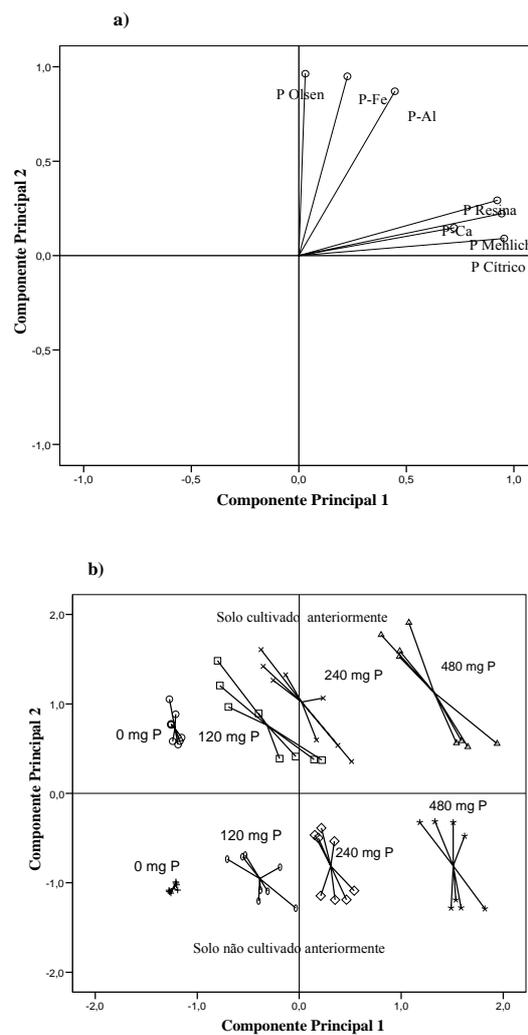


Figura 3 Comportamento dos extratores de P disponível e frações inorgânicas de P, pela análise de componentes principais em LVd adubado com fosfato natural reativo não cultivado anteriormente e com histórico de cultivo em plantio direto por dez anos

É sugestivo avaliando os resultados do presente trabalho, que o método de avaliação da disponibilidade de P deve considerar além das características químicas, físicas e biológicas do solo, também o histórico de uso e manejo anterior do solo. Outro aspecto importante observado é que no Latossolo estudado não ocorreu manutenção do fósforo no compartimento P-Ca, mesmo quando o nutriente foi aplicado em fontes de menor solubilidade.

4 CONCLUSÃO

A aplicação do fosfato natural reativo aumenta o teor de fósforo ligado ao cálcio, ao ferro e ao alumínio no LVd. Após solubilização, o fósforo da fração P-Ca é mobilizado para as frações P-Al e P-Fe.

Os principais compartimentos de fósforo inorgânico no LVd são P-Al e P-Fe. A fração P-Al apresenta estreitas correlações com os teores de P disponível avaliado por diferentes métodos.

Extratores alcalinos, como o extrator Olsen podem ser uma boa alternativa, para determinar os teores de P disponível no LVd com histórico de uso sob plantio direto, por liberarem as formas de P-Al, P-Fe, que representam as principais formas de acúmulo nestes sistemas.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R.; MELLO, J. W. V. de; ROCHA, W. S. D. da. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 152-249.
- CARDOSO, I. M. et al. Analysis of phosphorus by ^{31}P NMR in Oxisols under agroforestry and conventional coffee systems in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 112, n. 1/2, p. 51-70, 2003.
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 133-144, 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, MG, v. 27, n. 5, p. 896-900, 2003.
- DYER, B. On the analytical determination of probable available mineral plant food in soils. **Transactions of the Chemical Society**, London, v. 65, p. 115-167, Jan. 1894.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento de Conservação do Solo, 1997. 212 p.
- FERREIRA, D. F. **Análise multivariada**. Lavras: UFLA, 1996. 400 p.
- 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. **Anais...** São Carlos: Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p. 255-258.
- GATIBONI, L. C. et al. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. Modificações nas formas de fósforo do solo após extrações sucessivas com Mehlich-1, Mehlich-3 e resina trocadora de ânions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 363-371, 2005.

HARTWIG, I. et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 219-228, 2007.

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.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Crawley, v. 237, n. 2, p. 173-195, 2001.

KALEESWARI, R. K. et al. Evaluation of soil tests for phosphorus in lowland ecosystem. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, New Jersey, v. 3, n. 6, p. 581-583, 2007.

LI, H. et al. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, Crawley, v. 312, n. 1/2, p. 139-150, 2008.

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

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄**. North Carolina: NCDA & CS, 1953. 8 p. Disponível em: <<http://www.ncagr.gov/agronomi/pdf/mehlich53.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

MELLO, J. W. V. de; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 152-249.

MOSTASHARI, M. et al. Phosphorus fractions of selected calcareous soils of Qazvin province and their relationships with soil characteristics. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science**, Faisalabad, v. 3, n. 4, p. 547-553, 2008.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, Jan. 1962.

OLSEN, S. R. et al. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington: USDA, 1954. 22 p.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in brazilian cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009.

RAIJ, B. van et al. **Análise dos solos para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

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**, Viçosa, MG, v. 11, n. 1, p. 17-23, 1987.

ROCHA, A. T. da et al. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005.

SANTOS, E. de A.; KLIEMANN, J. H. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de cerrado e sua avaliação por extratores químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 3, p. 139-146, 2005.

SANTOS, J. Z. L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 705-714, 2008.

SILVA, F. C. da; RAIJ, B. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SILVA, M. A. et al. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, 1999.

TEÓFILO, F. H. P.; FROTA, J. N. E. Formas de fósforo e sua disponibilidade em solos da região da Ibiapaba-CE. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 13, n. 1/2, p. 61-69, 1982.

WRIGHT, A. L. Soil phosphorus stocks and distribution in chemical fractions for long-term sugarcane, pasture, turfgrass, and forest systems in Florida. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 83, n. 3, p. 223-231, 2009.

ARTIGO 2 Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolos com diferentes mineralogia e histórico de uso, adubados com fosfato reativo

RESUMO

O fracionamento de P no solo pode ser essencial para determinar quais frações estão relacionadas com a disponibilidade de P. O objetivo deste trabalho foi avaliar as formas inorgânicas de P e sua relação com o fósforo disponível, em Latossolos com diferente mineralogia, submetidos a diferentes manejos e adubados com fosfato reativo. Os tratamentos do experimento foram constituídos por quatro doses de P (0, 120, 240 e 480 mg dm⁻³) em quatro Latossolos (LVd1, LVd2, LVAd1 e LVAd2) e dois históricos de uso (solos cultivados e solos não cultivados) dispostos em delineamento inteiramente casualizado, arranjos em esquema fatorial (4 x 4 x 2), com quatro repetições. O fornecimento das doses de P foi realizado com base no teor de P₂O₅ total do fosfato reativo de Arad. As frações inorgânicas de fósforo ligadas ao Al, Fe e Ca e o P disponível pelos extratores de Mehlich-1, resina trocadora de íons, ácido cítrico e Olsen foram determinadas nos solos trinta dias após a aplicação dos tratamentos. Os teores de P-Al, P-Fe e P-Ca aumentaram em função da aplicação do fosfato reativo. A qualidade da fração argila dos Latossolos pode ser mais importante que a quantidade de argila para explicar o comportamento do fósforo inorgânico nos Latossolos de cerrado. Os métodos de determinação de P disponível com ação alcalina se correlacionaram melhor com as frações P-Al e P-Fe. Os métodos de extração com ação ácida se correlacionaram melhor com a fração P-Ca. A resina apresentou altos coeficientes de correlação com as três frações de P inorgânico em todos os solos.

Palavras-chave: Fracionamento de P. Latossolos. Adubação fosfatada. Manejo do solo.

ABSTRACT

Soil phosphorus fractionation can be essential to determine which fractions are related to P availability. The objective of this paper was to evaluate the inorganic P forms and their relationship with available P, in Latosols (Oxisols) with different mineralogy, submitted to different management and fertilized with reactive rock phosphate. The treatments of the experiment were made up of four P doses (0, 120, 240 and 480 mg dm⁻³) in four Latosols (LVd1, LVd2, LVAd1 and LVAd2) and two usage histories (cultivated and non-cultivated soils) arranged in a completely randomized design, in factorial outline (4 x 4 x 2), with four repetitions. The P doses supply was conducted based on Arad phosphate rock total P₂O₅ content. The inorganic P fractions bonded to Al, Fe and Ca and available P by Mehlich-1, resin ion exchange, citric acid and Olsen extractors were determined in the soils thirty days after treatments application. P-Al, P-Fe and P-Ca contents increased in function of the reactive rock phosphate application. Latosol clay fraction quality can be more important than the clay amount to explain inorganic phosphorus behavior in Cerrado Latosols. The available P determination methods with alkaline action were better correlated to P-Al and P-Fe fractions. The extraction methods with acid action were better correlated to P-Ca fraction. The resin method presented high correlation coefficients to the three inorganic P fractions in all soils.

Keywords: P fractions. Oxisols. Phosphate fertilization. Soil management.

1 INTRODUÇÃO

A região dos cerrados, importante produtora de grãos do país, ocupa 24% da área do território brasileiro, sendo que 46% desta área são ocupados por Latossolos (RESCK, 1998). Alguns Latossolos de cerrado se comportam como dreno de P e para tornar esses solos fontes do nutriente para as plantas são necessárias aplicações de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

A qualidade da fração argila é a principal característica que define os solos como fonte ou dreno de P (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). A fração argila dos Latossolos é constituída principalmente por caulinita, gibbsita, goethita e hematita, em diferentes proporções (FERREIRA, 2010). Nos valores de pH comumente observados nos solos agrícolas, a superfície dos óxidos de Fe e Al apresentam predominantemente cargas positivas capazes de reter vários tipos de ânions, sendo que fosfato é o íon preferencialmente adsorvido (COSTA; BIGHAM, 2009; POZZA et al., 2007).

A alternativa que se tem buscado para minimizar o efeito dreno de P do solo é o manejo da matéria orgânica com uma agricultura mais conservacionista, como nos sistemas agroflorestais e plantio direto. O aporte e a manutenção de matéria orgânica nos sistemas agroflorestais proporcionam uma maior concentração de fósforo no solo, além de favorecer sua ciclagem através do reservatório de fósforo orgânico (NOGUEIRA et al., 2008). O sistema plantio direto proporciona um aumento relativo das formas mais lábeis e maior disponibilidade de fósforo ao solo com o tempo (TOKURA et al., 2002).

Alguns trabalhos de pesquisa têm mostrado que o fósforo inorgânico parece ser o compartimento mais alterado pela adição dos fertilizantes fosfatados (BOSCHETTI; QUINTERO; GIUFFRÉ, 2009; PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009; SANTOS et al., 2008). Sá (1999) obteve pequenas respostas

de plantas de milho à adubação fosfatada em sistema de plantio direto, mesmo em solos considerados pobres em fósforo pelos métodos Mehlich-1 e resina de troca iônica. O autor explica que a utilização de extratores que avaliam uma pequena proporção do P-inorgânico não permite explicar o nível de resposta da cultura, havendo outros fatores envolvidos e que não são quantificados.

Neste sentido, o fracionamento de fósforo tem sido uma boa ferramenta para entender a disponibilidade e solubilidade do nutriente em diferentes tipos de solos e sistemas de manejo. A avaliação das frações de P no solo tem sido essencial para determinar quais frações estão relacionadas com a disponibilidade de P. A identificação e o entendimento das propriedades dos minerais da fração argila, em especial os óxidos de Fe e Al também podem explicar o comportamento do fósforo aplicado ao solo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as formas inorgânicas de P e sua relação com o fósforo disponível, em Latossolos com diferente mineralogia, submetidos a diferentes sistemas de manejo e adubados com fosfato reativo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. Amostras de solos foram coletadas na profundidade de 0-20 cm na Fazenda Alto Alegre, localizada no Município de Planaltina de Goiás - GO, situado a 15° 20' 04" de latitude sul e 47° 34' 42" de longitude oeste, sob vegetação nativa (solos não cultivados), sob cultivo em sistema de plantio direto e pastagem. As amostras foram caracterizadas em relação aos seus atributos, conforme método descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (1997) e Resende, Bahia Filho e Braga (1987) (Tabela 1). Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho Distrófico, com textura argilosa (LVd1) e com textura franco argilosa (LVd2) e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, com textura franco argilo arenosa (LVAd1) e com textura franco arenosa (LVAd2).

Os solos LVd1 e LVAd1 foram cultivados em sucessão soja e milho em sistema de plantio direto por dez anos. Na época da coleta o LVd1 estava com seis anos de plantio direto contínuo, pois no ano de 2000 foi revolvido com arado de aiveca, ocasião em que recebeu 1 t ha⁻¹ de calcário e adubação corretiva com 650 kg ha⁻¹ de fosfato reativo de Gafsa. O LVAd1 estava com quatro anos de plantio direto contínuo, pois foi subsolado e recebeu 2 t ha⁻¹ de calcário no ano de 2002. Durante os dez anos, essas duas áreas receberam em média 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅.

Os solos LVd2 e LVAd2 foram manejados com pastagens de *Brachiaria brizantha*, cultivar Marandu de 1986 a 1999, com soja e milho nos três anos seguintes e novamente pastagens por três anos. Em 1999 as duas áreas foram gradeadas, receberam 2,5 t ha⁻¹ de calcário e adubação corretiva com 650 kg ha⁻¹ de fosfato reativo de Gafsa. Quando cultivados com soja e milho, os solos receberam em média 88 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Tabela 1 Características químicas, físicas e mineralógicas relacionadas à disponibilidade de fósforo nos solos, antes da aplicação dos tratamentos

Solos	Uso	pH H ₂ O	P- Meh	P- res	P- rem	CMAP	Ca	K
LVd1	SNC	5,5	1,0	3,6	9,8	1139	0,5	0,11
	SC	5,7	11,6	37,0	14,6	994	2,2	0,31
LVd2	SNC	4,9	1,9	3,2	15,4	672	0,7	0,28
	SC	7,0	16,9	13,2	19,9	528	4,4	0,24
LVAd1	SNC	5,2	1,5	2,8	23,2	315	0,5	0,15
	SC	5,8	26,5	35,3	36,0	147	3,6	0,63
LVAd2	SNC	5,2	1,7	3,1	26,7	196	0,5	0,12
	SC	5,7	11,9	12,9	32,6	136	2,1	0,4

		MO	Argila	Ct	Gb	Hm	Gt	Ct/ (Ct+Gb)	Ct/ (Ct+Gb)
		g kg ⁻¹							
LVd1	SNC	32							
	SC	28	570	115,8	66,10	2,78	20,01	0,64	0,88
LVd2	SNC	25							
	SC	25	320	25,2	3,60	0,83	1,66	0,87	0,67
LVAd1	SNC	21							
	SC	27	200	5,60	1,50	0,18	0,48	0,78	0,73
LVAd2	SNC	25							
	SC	25	130	2,20	0,25	0,08	0,14	0,90	0,65

SNC: solo não cultivado anteriormente; SC: solo cultivado; P-Meh: fósforo extraído por Mehlich-1; P: fósforo extraído pela resina de troca iônica; P-rem: fósforo remanescente; CMAP: capacidade máxima de adsorção de fósforo; MO: matéria orgânica; (Ct: caulinita; Gb:gibbsita; Hm: hematita; Gt: goethita, corrigidos para os teores de argila).

Os tratamentos do experimento foram constituídos por quatro doses de P (0, 120, 240 e 480 mg dm⁻³) em quatro solos com diferentes mineralogias (LVd1, LVd2, LVAd1 e LVAd2) e dois históricos de uso (solos cultivados e solos não cultivados) dispostos em delineamento inteiramente casualizado, arranjos em esquema fatorial (4 x 4 x 2), com quatro repetições. O fornecimento das doses de P foi realizado com base no teor de P₂O₅ total do fosfato reativo de Arad (30%). O experimento foi realizado em vasos com capacidade para quatro dm³ de solo.

Após 30 dias de incubação com umidade controlada diariamente para 60% do volume total de poros ocupados por água foram coletadas amostras dos solos para análise dos seus atributos. As amostras de solo foram submetidas ao fracionamento do fósforo inorgânico, pelo método proposto por Chang e Jackson (1957). O método consiste na extração sequencial do fósforo ligado ao alumínio (P-Al) através da solução de fluoreto amônio (NH_4F 0,5M a pH 8,2), fósforo ligado ao ferro (P-Fe) através da solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,1 M) e fósforo ligado ao cálcio (P-Ca) extraído pela solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4 0,25M). As amostras ainda foram analisadas pelos extratores Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}) (MEHLICH, 1953), resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987), ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 2% p/p) (modificado de DYER, 1894) e Olsen (NaHCO_3 0,5 M) (OLSEN et al., 1954).

A determinação dos teores de fósforo nos extratos foi realizada por espectrofotometria, conforme método proposto por Murphy e Riley (1962), que consiste na formação do complexo fosfomolibdico de cor azul em meio sulfúrico com ácido ascórbico como redutor. Foram preparadas soluções de referência para obtenção de curvas analíticas, através da diluição serial da solução padrão de concentração 1000 mg L^{-1} de P.

Os dados obtidos foram submetidos às análises de variância e de correlações (Pearson r). Foram ajustadas equações de regressão para as diferentes frações de P no solo em função das doses de P aplicadas. Todas as operações matemáticas e estatísticas foram realizadas com auxílio dos programas Sisvar (FERREIRA, 2000) e SPSS 15.0 (*Statistical Package for Social Sciences*).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a fração P-Al, houve diferença significativa em função das doses de P aplicadas, sem interação entre as doses e o histórico de uso e/ou mineralogia do solo (Tabela 7A). Logo, foi gerada uma equação de regressão com os valores médios de P-Al. A fração P-Al apresentou comportamento linear crescente em função das doses de P aplicadas (Figura 1a). Esse comportamento sugere que os solos com diferentes características mineralógicas e de histórico de uso apresentaram a mesma tendência de aumento de P-Al com a aplicação do fosfato reativo. A presença de gibbsita nos solos (Tabela 1), provavelmente influencia os teores de P-Al. Pozza et al. (2007) estudaram a retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural e encontraram que o fosfato foi o ânion mais retido e de maior afinidade pela gibbsita.

Para a fração P-Fe houve interação tripla entre o solo, o histórico de uso e as doses de P aplicadas (Tabela 7A). A interação foi desdobrada de forma a avaliar o efeito das doses em cada solo, cultivado anteriormente ou não. Nos solos não cultivados anteriormente, o solo mais goethítico (LVd1) foi o que apresentou os maiores teores de P-Fe, enquanto os solos com menores teores de goethita apresentaram as menores concentrações de P-Fe. Rolin Neto et al. (2004) estudaram os processos de adsorção de P em Latossolos, com texturas e materiais de origem variáveis, desde rochas básico-alcálicas até ultrabásicas e afirmaram que a proporção e a área superficial da gibbsita e da goethita têm participação destacada na adsorção de P. Farias et al. (2009) encontraram correlação positiva e significativa entre o teor de oxi-hidróxido de Fe livre e a capacidade máxima de adsorção de P.

A relação entre os teores de argila e os teores dos constituintes mineralógicos nos solos deste estudo é direta, pois quanto maior o teor de argila, maior o teor de caulinita, de gibbsita, de goethita e de hematita (Tabela 1), de onde se conclui que os teores de P-Al e P-Fe estão relacionados à quantidade e à qualidade da fração argila dos Latossolos.

Para a fração P-Ca também houve interação tripla entre o solo, o histórico de uso e as doses de P aplicadas (Tabela 7A). A interação foi desdobrada do mesmo modo que a relatada para a fração P-Fe. A fração P-Ca foi a que se apresentou com os menores teores sem a aplicação de fosfato, indicando que Latossolos em condições de cerrado são pobres em P-Ca, diferentemente de solos com natureza calcária, como os histossolos que promovem a fixação do P-Ca ao invés de P ligado a Fe e Al (WRIGHT, 2009). Nota-se que o LVd2, solo mais caulínico e menos gibbsítico (Tabela 1) apresentou os maiores teores de P-Ca, o que está relacionado ao pequeno percentual de gibbsita em relação a caulinita na fração argila (10%). Esse comportamento pode indicar uma menor capacidade de acúmulo de P na fração P-Al. No entanto, este mesmo solo apresentou uma forte tendência de acúmulo na fração P-Fe, o que pode ser confirmado pelo maior coeficiente angular da regressão linear de P-Fe no LVd2 (Figura 1 b). Apesar dos teores dos óxidos de Fe no LVd2 serem menores que nos demais solos deste estudo, a goethita parece ser a responsável por esse comportamento por apresentar maior área superficial reativa, o que facilita a troca entre os fosfatos e os grupos OH⁻ de superfície (CURI et al., 1988).

A análise do teor de fósforo inorgânico total, (Pi-total) que é o somatório de P-Al, P-Fe e P-Ca, permite verificar a contribuição do conjunto das frações inorgânicas para o fósforo armazenado no solo (Figura 1d). Os solos com menores teores de óxidos (LVAd1 e LVAd2) apresentaram menores teores de Pi-total do que os solos mais oxidicos (LVd1 e LVd2), o que mostra que o P adsorvido tem relação direta com a quantidade de óxidos presentes no solo. Souza et al. (2006) relataram que à medida que os solos apresentam maior teor de óxidos, aumenta a adsorção de P bem como seu conteúdo nas formas ligadas a Al e Fe.

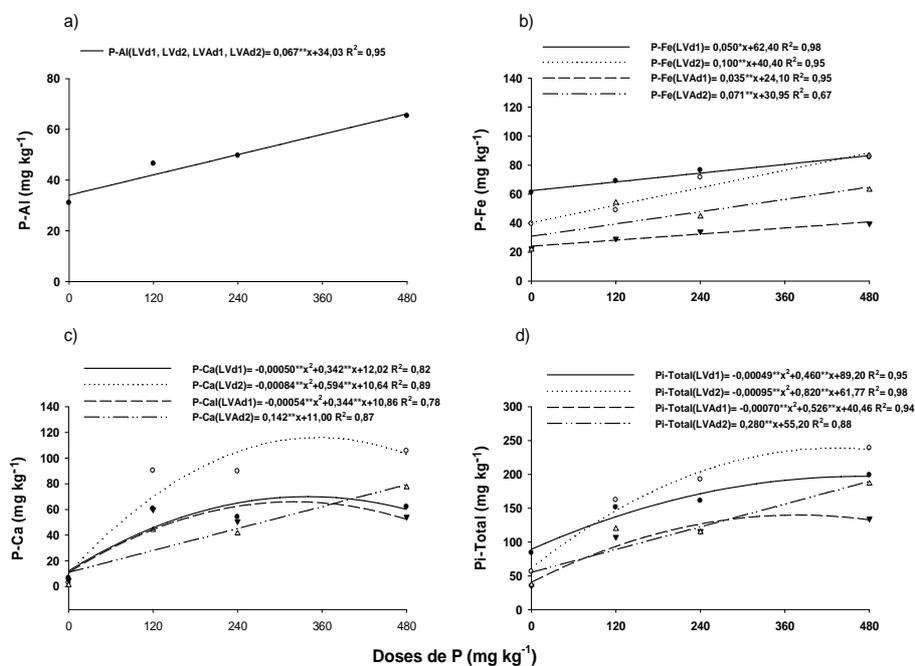


Figura 1 Valores médios de fósforo ligado a alumínio (P-Al) dos quatros solos e dos dois históricos de uso em função da doses de P aplicadas (a). Fósforo ligado a ferro (P-Fe) (b), fósforo ligado a cálcio (P-Ca) (c) e fósforo inorgânico total (Pi-Total) (d) no LVd1, LVd2, LVAd1 e LVAd2 não cultivados anteriormente em função das doses de P aplicadas

Nos solos cultivados anteriormente, os solos LVd1 e LVAd1 estavam sob plantio direto, enquanto os solos LVd2 e LVAd2 sob pastagem. Observa-se que as concentrações de P-Al foram maiores nos solos que foram cultivados em sistema de plantio direto (LVd1 e LVAd1) do que nos solos com histórico de uso sob pastagem (LVd2 e LVAd2). Segundo Schlindwein e Anghinoni (2000) o tempo de adoção do sistema plantio direto propicia o acúmulo de fósforo em superfície devido à baixa mobilidade no solo.

O LVd1, solo mais goethítico deste estudo (Tabela 1), foi o que apresentou os maiores teores de P-Fe, mas o LVd2, apesar de apresentar o segundo maior teor de argila e de goethita, apresentou comportamento semelhante ao LVAd2, solo menos oxidico. (Figura 2a). Isso pode ser explicado pelas relações entre os constituintes mineralógicos dos solos, o LVd2 e o LVAd2 apresentaram relações $Gt/(Gt+Hm)$ muito próximas, iguais a 0,67 e 0,65, respectivamente (Tabela 1). Esses resultados reforçam a idéia de que a qualidade da fração argila define o solo como fonte ou dreno de fósforo. Outro fato a se considerar é o histórico de uso destes solos, o LVd1 recebeu em cultivos anteriores o equivalente a 830 kg ha^{-1} de P_2O_5 , enquanto o LVd2 recebeu 500 kg ha^{-1} de P_2O_5 . A diferença da quantidade de adubo fornecida provavelmente também influenciou os teores de P-Fe dos dois solos.

A fração P-Ca apresentou comportamento diferente das frações P-Al e P-Fe (Figura 2 b). O LVd2, solo com o segundo maior teor de óxidos e cultivado sob pastagem, apresentou os maiores teores de P-Ca, o que pode estar relacionado ao valor de pH deste solo, $pH= 7,0$ (Tabela 1). Oxmann, Pham e Lara (2008) incubaram amostras de sedimentos em diferentes valores de pH e quantificaram as espécies de P. Os autores observaram que a acidificação dos sedimentos resultou em uma diminuição de P-Ca, acompanhada por um aumento de P ligado a Al e Fe; também observaram um efeito inverso pelo aumento do pH original dos sedimentos. Além disso, a concentração de Ca disponível no LVd2 era alta, $4,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o que pode ter dificultado a solubilização do fosfato de cálcio do adubo. Segundo Mello e Perez (2009) em solos e sedimentos ácidos de regiões tropicais, normalmente não se espera a formação de fosfatos de cálcio, devido à limitada presença de Ca solúvel, o que não parece ser o caso do LVd2.

Os maiores valores de Pi-total foram observados no solo mais goethítico com histórico de uso em sistema de plantio direto e os menores valores de Pi-

total foram apresentados pelos solos menos goethíticos que estavam sob pastagem (Figura 2c). A maior disponibilidade de P na camada superficial do solo em sistemas de plantio direto é decorrente da aplicação anual de fertilizantes fosfatados em sulco ou a lanço, da liberação de fósforo orgânico através da decomposição dos resíduos vegetais deixados na superfície e da menor intensidade de fixação de fósforo ocasionada pelo menor contato desse nutriente com óxidos, oxi-hidróxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (SOUSA; LOBATO, 2000).

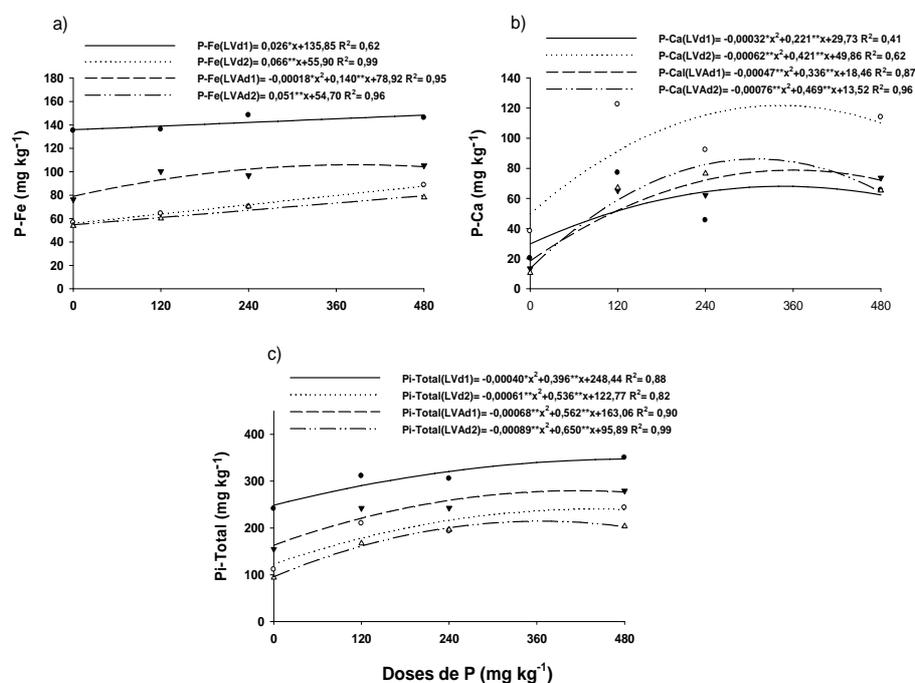


Figura 2 Fósforo ligado ao ferro (P-Fe) (a), ao cálcio (P-Ca) (b) e fósforo inorgânico total (Pi-total) (c) em solos cultivados anteriormente sob sistema de plantio direto (LVd1 e LVAd1) e sob pastagem (LVd2 e LVAd2)

3.1 Correlações entre as frações inorgânicas e a disponibilidade de P em Latossolos com diferentes proporções dos constituintes mineralógicos

As correlações de Pearson entre as frações inorgânicas e os teores de P disponíveis pelos métodos Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico 2% e Olsen, teores de argila, caulinita, gibbsita, goethita e hematita em Latossolos com diferentes históricos de uso estão representadas na Tabela 2. Pode-se observar que os óxidos de Fe e Al apresentaram correlação positiva e significativa com os teores de P-Al e P-Fe, indicando que quanto maiores os teores destes constituintes mineralógicos maior é capacidade do solo em armazenar fósforo nas frações P-Al e P-Fe.

Pode-se observar também que os extratores Olsen e resina apresentaram os maiores coeficientes de correlação para as frações P-Al e P-Fe. Outro aspecto evidente é que o extrator Olsen foi seletivo para as formas P-Al e P-Fe, enquanto a resina apresentou os maiores coeficientes de correlação com as frações P-Al, P-Fe e P-Ca. A semelhança no comportamento dos dois extratores para as frações P-Al e P-Fe está relacionada ao tamponamento do pH (8,5) da resina com NaHCO_3 0,5 M, que é a solução extratora do método de Olsen. Os maiores coeficientes para P-Al e P-Fe estão relacionados à ação alcalina dos extratores, capaz de solubilizar fosfatos de alumínio e de ferro. Lindsay (2001) mostra que os fosfatos de Fe e Al aumentam a solubilidade com o aumento do pH. O princípio do método de Olsen é a liberação do P ligado ao Fe e ao Al, pois em pH elevado, o íon HCO_3^- atua substituindo o P adsorvido no solo e reduzindo a atividade de Ca^{2+} em solução (SILVA; RAIJ, 1999). A explicação das altas correlações da resina com as três formas de P inorgânico, extraídas em diferentes valores de pH está relacionada à mistura da resina catiônica com a resina aniônica. As resinas com grupamentos ácidos ou básicos, ao contrário das soluções aquosas de ácidos e bases, não se dissociam em duas espécies iônicas. Somente uma espécie é dissociada, na resina catiônica, o H^+ e na aniônica, a

hidroxila OH⁻. As demais espécies ficam ligadas às cadeias de estireno e divinil benzeno (KREMER, 2007).

Os extratores Mehlich-1 e ácido cítrico apresentaram maiores coeficientes de correlação para a fração P-Ca, o que está de acordo com a solubilidade dos fosfatos de Ca que aumenta com a redução do pH (LINDSAY, 2001) e/ou com a ação química ácida desses extratores, que é capaz de solubilizar formas de fósforo ligadas a Ca (KLIEMANN; LIMA, 2001).

Tabela 2 Matriz de correlações com coeficientes de Pearson entre as frações inorgânicas de P, métodos de avaliação da sua disponibilidade e atributos dos solos

	P-Al	P-Fe	P-Ca	P.Mehlich-1	P.Resina	P.Ac.Cítrico	P.Olsen	Argila	Caulinita	Gibbsita	Hematita	Goethita
P-Al	1,00											
P-Fe	0,87**	1,00										
P-Ca	0,17	0,25**	1,00									
P.Mehlich-1	0,43**	0,29**	0,54**	1,00								
P.Resina	0,61**	0,53**	0,54**	0,87**	1,00							
P.Ac.Cítrico	0,35**	0,24**	0,55**	0,97**	0,84**	1,00						
P.Olsen	0,68**	0,47**	0,03	0,34**	0,30**	0,22*	1,00					
Argila	0,32**	0,57**	0,03	-0,16	0,14	-0,13	-0,25**	1,00				
Caulinita	0,36**	0,58**	-0,05	-0,17*	0,14	-0,15	-0,21*	0,97**	1,00			
Gibbsita	0,40**	0,58**	-0,11	-0,17	0,15	-0,16	-0,15	0,93**	0,99**	1,00		
Hematita	0,34**	0,58**	-0,01	-0,17	0,14	-0,14	-0,24**	0,99**	0,99**	0,97**	1,00	
Goethita	0,39**	0,58**	-0,10	-0,17	0,15	-0,16	-0,16	0,94**	0,99**	1,00**	0,98**	1,00

* Significativo ao nível de 0.05, pelo test t.

** Significativo ao nível de 0.01, pelo test t.

De modo geral, as frações inorgânicas de P foram afetadas pelas doses do fosfato reativo, aplicadas e pelo histórico de uso dos solos, que também está relacionado à quantidade de adubos fosfatados aplicados, mas envolve outros aspectos, como o manejo da matéria orgânica e correção de acidez do solo. Por último, o teor das frações inorgânicas de P está relacionado às características do próprio solo, como teor de argila e composição mineralogia da argila. Cada método de determinação de fósforo disponível, devido às propriedades químicas do extrator, apresenta preferência para se correlacionar com determinada fração inorgânica de P, à exceção da resina de troca iônica que apresentou altos coeficientes para as três formas de P inorgânico, P-Al, P-Fe e P-Ca.

4 CONCLUSÃO

Em todos os solos os teores de P-Al, P-Fe e P-Ca aumentaram em função da aplicação do fosfato reativo. A qualidade da fração argila dos Latossolos pode ser mais importante que a sua quantidade, para explicar o comportamento do fósforo inorgânico nos Latossolos de cerrado.

Métodos de determinação de P disponível com ação alcalina se correlacionaram melhor com as frações P-Al e P-Fe, enquanto que os métodos de extração com ação ácida se correlacionaram melhor com a fração P-Ca.

Uma vez que as frações P-Al e P-Fe representam os maiores compartimentos de fósforo nestes solos, extratores de ação alcalina (Olsen) seriam promissores na avaliação da disponibilidade do nutriente para as plantas.

Nos solos não cultivados anteriormente, quanto mais oxidico o solo maior o teor de P-Fe. Nos solos cultivados anteriormente quanto maior a proporção de goethita em relação a hematita, maior o teor de P-Fe.

REFERÊNCIAS

BOSCHETTI, N. G.; QUINTERO, C. E.; GIUFFRÉ, L. Phosphorus fractions of soils under *Lotus corniculatus* as affected by different phosphorus fertilizers. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 45, n. 4, p. 379-384, 2009.

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

COSTA, A. C. S. da; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 505-572.

CURI, N. et al. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil sudeste. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 267-282.

DYER, B. On the analytical determination of probable available mineral plant food in soils. **Transactions of the Chemical Society**, London, v. 65, p. 115-167, Jan. 1894.

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

FARIAS, D. R. de et al. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: I. isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 623-632, 2009.

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. **Anais...** São Carlos: Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p. 255-258.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. de J. V. (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2010. p. 1-27.

KLIEMANN, H. J.; LIMA, D. V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 111-119, 2001.

KREMER, T. de O. **Resinas de troca iônica**. Kurita, 2007. Disponível em: <http://www.kurita.com.br/adm/download/Resinas_de_Troca_Ionica.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2011.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New Jersey: Blackburn, 2001. 449 p.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na, and NH₄**. North Carolina: NCDA & CS, 1953. 8 p. Disponível em: <<http://www.ncagr.gov/agronomi/pdffiles/mehlich53.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

MELLO, J. W. V. de; PEREZ, D. V. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2009. p. 152-249.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, Jan. 1962.

NOGUEIRA, R. da S. et al. Formas de fósforo em Luvisolo Crômico Órtico sob sistemas agroflorestais no município de Sobral-CE. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 39, n. 4, p. 494-502, 2008.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 471-550.

OLSEN, S. R. et al. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington: USDA, 1954. 22 p.

OXMANN, J. F.; PHAM, Q. H.; LARA, R. J. Quantification of individual phosphorus species in sediment: a sequential conversion and extraction method. **European Journal of Soil Science**, Bognor Regis, v. 59, p. 1177-1190, Dez. 2008.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009.

POZZA, A. A. A. et al. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1627-1633, 2007.

RAIJ, B. van et al. **Análise dos solos para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RESCK, D. V. S. Plantio direto: desafios para os cerrados. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 7.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 5.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 2., 1998, Caxambu, MG. **Resumos...** Lavras: UFLA, 1998. p. 32-33.

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**, Viçosa, MG, v. 11, n. 1, p. 17-23, 1987.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.

SÁ, J. C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O. et al. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS, 1999. p. 267-319.

SANTOS, J. Z. L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 705-714, 2008.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 611-617, 2000.

SILVA, F. C. da; RAIJ, B. V. R. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência no cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: SBCS, 2000. 1 CD-ROM.

SOUZA, R. F. de et al. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.

TOKURA, A. M. et al. 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, 2002.

WRIGHT, A. L. Soil phosphorus stocks and distribution in chemical fractions for long-term sugarcane, pasture, turfgrass, and forest systems in Florida. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 83, n. 3, p. 223-231, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A - TABELAS

Tabela 1 Atributos químicos do Latossolo Vermelho Distrófico não cultivado anteriormente, 30 dias após a aplicação dos tratamentos (antes do plantio do feijoeiro) e após o plantio do feijoeiro

Atributos	Solo não cultivado								
	Doses de P aplicadas (mg kg ⁻¹)								
	0		120		240		480		
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	
pH H ₂ O		5,9	5,3	6,0	5,3	5,7	5,3	6,0	5,4
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)		1,0	0,9	21,7	17,7	70,0	68,9	128,0	109,9
P-resina (mg dm ⁻³)		1,0	4,9	39,2	31,1	84,0	70,0	120,0	97,9
P-ác. cítrico (mg dm ⁻³)		4,2	6,7	30,2	29,0	76,2	86,7	211,7	202,7
P-Olsen (mg dm ⁻³)		3,2	5,3	3,9	6,8	4,1	8,5	3,8	11,0
P-rem (mg L ⁻¹)		8,7	9,6	8,9	9,6	8,5	9,5	8,5	9,5
K (mg dm ⁻³)		117	317	115	298	117	288	122	270
Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)		1,3	1,5	1,4	1,6	1,5	2	1,7	2,2
Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)		2,0	2,4	2,0	2,3	2,0	2,4	2,1	2,2
Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)		0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H + Al (cmol _c dm ⁻³)		3,3	3,6	3,2	3,7	3,2	3,8	3,2	3,6
SB (cmol _c dm ⁻³)		3,5	4,9	3,6	4,9	3,8	5,0	4,1	5,1
t (cmol _c dm ⁻³)		3,5	5,0	3,6	5,0	3,8	5,0	4,1	5,1
T (cmol _c dm ⁻³)		6,8	8,4	6,8	8,4	7,0	8,8	7,2	8,6
V (%)		51	56,4	53	56,4	54	57,7	57	58,1
m (%)		0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MO (g kg ⁻¹)		3,4	3,5	3,4	3,5	3,3	3,5	3,2	3,4
P-rem (mg L ⁻¹)		8,7	9,6	8,9	9,6	8,5	9,5	8,5	9,5
Zn (mg dm ⁻³)		2,7	3,0	2,8	3,0	3,3	3,4	3,7	4,5
Fe (mg dm ⁻³)		88,0	98,8	87,0	98,8	75,0	76,8	76,0	81,4
Mn (mg dm ⁻³)		12	14,2	13,2	14,2	13	14,9	13,6	15,6
Cu (mg dm ⁻³)		1,2	1,2	1,13	1,2	1,1	1,9	1,2	1,7
B (mg dm ⁻³)		0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,6
S (mg dm ⁻³)		35	37,8	38	37,8	43	41,4	50	43,4

Tabela 2 Atributos químicos do Latossolo Vermelho Distrófico com histórico de uso em plantio direto, 30 dias após a aplicação dos tratamentos (antes do plantio do feijoeiro) e após o plantio do feijoeiro

Atributos	Solo cultivado								
	Doses de P aplicadas (mg kg ⁻¹)								
	0		120		240		480		
	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	Antes	Após	
pH H ₂ O		5,6	4,8	5,7	4,9	5,6	5,0	5,7	5,0
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)		10,0	9,8	40,0	33,7	80,2	76,8	170,0	137,3
P-resina (mg dm ⁻³)		32,0	29,2	78,2	53,1	104,5	75,6	154,0	116,4
P-ác. cítrico (mg dm ⁻³)		7,2	8,5	48,2	29,2	111,7	66,7	192,5	182,0
P-Olsen (mg dm ⁻³)		12,7	19,7	12,2	22,6	14,4	26,0	15,5	26,3
P-rem (mg L ⁻¹)		9,7	10,3	9,8	10,5	9,7	5,5	10,0	5,4
K (mg dm ⁻³)		189	195	183	196	94	190	89	193
Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³)		2,6	2,5	2,5	2,9	2,7	2,7	3,0	3,5
Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³)		1,4	1,7	1,3	1,7	1,3	1,8	1,2	1,8
Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³)		0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
H + Al (cmol _c dm ⁻³)		3,6	4,3	3,4	4,2	3,1	7,6	3	3,8
SB (cmol _c dm ⁻³)		4,4	4,5	4,3	5,2	4,3	4,9	4,4	5,7
t (cmol _c dm ⁻³)		4,4	4,7	4,3	5,3	4,3	4,9	4,4	5,7
T (cmol _c dm ⁻³)		8,0	9,2	7,7	9,3	7,7	10,8	7,4	9,7
V (%)		55	52,4	56	55,5	57	48,6	58	60,1
m (%)		0,0	1,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MO (g kg ⁻¹)		2,9	2,9	2,8	3,1	3	3,0	2,9	3,0
P-rem (mg L ⁻¹)		9,7	10,3	9,8	10,5	9,7	5,5	10,0	5,4
Zn (mg dm ⁻³)		8,5	10,5	8,9	11,1	8,7	9	9,1	10,5
Fe (mg dm ⁻³)		55,0	66,3	49,0	55,2	40,0	52,3	38,0	48,6
Mn (mg dm ⁻³)		13	16,5	13	19,6	12	15,2	12	15,8
Cu (mg dm ⁻³)		2,6	2,5	2,7	11,0	2,3	2,3	2,1	2,1
B (mg dm ⁻³)		0,4	0,7	0,4	0,7	0,5	0,6	0,4	0,8
S (mg dm ⁻³)		44	43,7	51	46	52	43,5	66	51,5

Tabela 3 Resumo das análises de variância para o fósforo disponível pelos métodos Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico e Olsen no solo LVd, antes do cultivo feijoeiro

FV	GL	QM			
		Mehlich-1	Resina	Ac. cítrico	Olsen
Uso	1	3160,12**	7750,12**	693,78**	794,41**
Doses	3	31635,25**	21040,83**	59126,86**	5,74**
Uso x doses	3	468,71**	122,12 ^{ns}	1077,95**	3,83**
erro	24	9,31	50,35	57,09	0,43
Total	31				
C.V.(%)		4,69	9,26	8,86	7,55

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste F.

^{ns} = Não significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

Tabela 4 Resumo das análises de variância para as frações de fósforo ligadas a Al (P-Al), ligada a Fe (P-Fe), ligadas a Ca (P-Ca) e P inorgânico total (Pi-total) no solo LVd, depois do cultivo feijoeiro

FV	GL	QM			
		Mehlich-1	Resina	Ac. cítrico	Olsen
Uso	1	1812,47**	2468,76**	750,78**	1985,44**
Doses	3	22223,74**	12129,60**	54440,61**	59,32**
Uso x doses	3	162,63**	138,65*	305,53**	3,62 ^{ns}
erro	24	535,36	42,33	37,61	1,78
Total	31				
C.V.(%)		40,67	10,88	8,02	8,45

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste F.

^{ns} = Não significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

Tabela 5 Resumo das análises de variância para as frações de fósforo ligadas a Al (P-Al), ligada a Fe (P-Fe), ligadas a Ca (P-Ca) e P inorgânico total (Pi-total) no solo LVd, antes do cultivo feijoeiro

		QM		
		P-Al	P-Fe	P-Ca
Uso	1	48984,50**	37332,78**	318,78 ^{ns}
Doses	3	2870,83**	550,95**	5006,11**
Uso x doses	3	116,50*	71,28 ^{ns}	257,61 ^{ns}
erro	24	19,04	104,53	160,03
Total	31			
C.V.(%)		6,31	9,54	25,87

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste F.

^{ns} = Não significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

Tabela 6 Resumo das análises de variância para as frações de fósforo ligadas a Al (P-Al), ligada a Fe (P-Fe), ligadas a Ca (P-Ca) e P inorgânico total (Pi-total) no solo LVd, depois do cultivo feijoeiro

		QM		
		P-Al	P-Fe	P-Ca
Uso	1	28980,28**	33930,12**	36,12 ^{ns}
Doses	3	8706,61**	3480,92**	3409,21**
Uso x doses	3	197,95*	197,71 ^{ns}	204,88 ^{ns}
erro	24	48,28	124,48	121,85
Total	31			
C.V.(%)		8,70	9,19	22,16

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste F.

^{ns} = Não significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

Tabela 7 Resumo das análises de variância para as frações de fósforo ligadas a Al (P-Al), ligada a Fe (P-Fe), ligadas a Ca (P-Ca) e P inorgânico total (Pi-total) nos solos LVd1, LVd2, LVAd1 e LVAd2 cultivados e não cultivados anteriormente

FV	GL	QM			
		P-Al	P-Fe	P-Ca	Pi-total
Histórico	1	39025,2**	50880,5**	5214,8**	262269,0**
Solos	3	13952,9**	17287,5**	9068,5**	41505,3**
Doses	3	6299,2**	4467,3**	29069,5**	92121,2**
Hist x solos	3	8196,3**	7349**	246,8 ^{ns}	29812,9**
Hist x doses	3	307,5 ^{ns}	92,4 ^{ns}	338,2 ^{ns}	592,5 ^{ns}
Solos x dose	9	261,5 ^{ns}	220,3**	650,7**	750,0*
Hist x solos x doses	9	430,3	172,3*	453,41*	933,7**
erro	96	318,6	84,3	199,84	344,8
Total	127				
C.V.(%)		37,14	12,6	24,9	10,5

LVd1 = Latossolo Vermelho Distrófico, textura argilosa.

LVd2 = Latossolo Vermelho Distrófico, textura franco argilosa.

LVAd1 = Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura franco argilo arenosa.

LVAd2 = Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura franco arenosa.

*Significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.

**Significativo ao nível de 1% probabilidade, pelo teste F.

^{ns}= Não significativo ao nível de 5% probabilidade, pelo teste F.