

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE FÓSFORO NO
SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E DE
ADUBAÇÃO NITROGENADA**

Jacqueline Nayara Ferraça Leite
Engenheira Agrônoma

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FORMAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE FÓSFORO NO
SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E DE
ADUBAÇÃO NITROGENADA**

Jacqueline Nayara Ferraça Leite

Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal,
como parte das exigências para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2015

L533f Leite, Jacqueline Nayara Ferraça
Formas orgânicas e inorgânicas de fósforo no solo em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada / Jacqueline Nayara Ferraça Leite. -- Jaboticabal, 2015
iv, 57 p.; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientadora: Mara Cristina Pessoa da Cruz
Banca examinadora: Manoel Evaristo Ferreira, Renato Yagi
Bibliografia

1. Fracionamento de P. 2. Leguminosas. 3. Gramíneas. 4. Adubação nitrogenada. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.452:631.543

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: FORMAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE FÓSFORO NO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E DE ADUBAÇÃO NITROGENADA.

AUTORA: JACQUELINE NAYARA FERRAÇA LEITE

ORIENTADORA: Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO) , pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. RENATO YAGI

Instituto Agronômico do Paraná / Ponta Grossa/PR

Data da realização: 27 de julho de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Jacqueline Nayara Ferraça Leite – nascida em 30 de maio de 1984, na cidade de Campinas – SP, graduou-se em 2013 em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), campus de Jaboticabal. Em março de 2013 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na FCAV. Durante o mestrado, de março de 2013 a julho de 2014 foi bolsista CAPES e de agosto de 2014 a fevereiro de 2015, da Fundação Agrisus Agricultura Sustentável.

"Dê um peixe a um homem e você o alimentará por um dia. Ensine-o a pescar
e você o alimentará por toda a vida."
Provérbio Chinês

À minha mãe,
Josiane Ferraça

À minha irmã,
Janaína Ferraça

Aos meus avós
Maria Rios Fernandes Ferraça e Adelmo Ferraça

À minha orientadora,
Mara Cristina Pessôa da Cruz

Aos meus amigos,
Carmen Aparecida Marques
Stefanie Bertti Coelho
Aline Rocha Guarini
Natali Calazança dos Santos
Diego Favero

Pelo amor, companheirismo, amizade e incentivo incondicional nas etapas mais difíceis deste trabalho, e a quem sou infinitamente grata,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Campus de Jaboticabal, pela oportunidade de aquisição de conhecimento e competências.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Agrisus – Agricultura Sustentável, pela concessão de bolsa de Mestrado.

À Professora Dra. Mara Cristina Pessoa da Cruz, minha orientadora, pela sabedoria, suporte, compreensão, paciência, amizade e carinho.

Ao Professor Dr. Manoel Evaristo Ferreira, pela valiosa contribuição com o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. José Carlos Barbosa, pela atenção e disponibilidade para me auxiliar nas análises estatísticas.

Ao Professor Dr. Itamar Andrioli, por ter gentilmente cedido a área para a coleta das amostras de solo e pelas informações referentes à área do experimento.

Aos amigos, Silvan Gomes de Brito, Vinícius Gregório, Samira Furtado de Queiroz, Thiago de Barros Sylvestre, Lucas Boscov Braos, Aluísio Hideki Togoro, Aline Carla Trombeta Bettiol e Marina Ali Mere Bergamasco, por todo auxílio que me ofereceram.

SUMÁRIO

	Páginas
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Local, solo e clima.....	14
3.2 Histórico da área, tratamentos e delineamento experimental.....	14
3.3 Coleta das amostras de solo e avaliações.....	15
3.4 Fracionamento do fósforo.....	16
3.5 Forma de análise dos resultados.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1 Fósforo total, disponível e orgânico total.....	21
4.2 Formas de P no solo.....	26
4.4 Acurácia do fracionamento.....	43
5. CONCLUSÕES.....	44
6. REFERÊNCIAS.....	45

FORMAS ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE FÓSFORO NO SOLO EM FUNÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA E DE ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO – O cultivo de plantas de cobertura em sistema plantio direto e a adubação nitrogenada podem alterar a ciclagem e o acúmulo de P no solo. O conhecimento da solubilidade, distribuição e proporção das formas de P pode fornecer informações importantes para a avaliação da disponibilidade do elemento para as plantas e possibilitar a maximização da eficiência do uso de fertilizantes fosfatados. Diante disso, pretendeu-se avaliar os efeitos de plantas de cobertura em pré-safra de milho, e de doses de adubo nitrogenado em cobertura no milho, nas formas de P do solo, em experimento de longa duração. O experimento está instalado em Latossolo Vermelho Distrófico, textura argilosa. O delineamento experimental é em blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos principais são culturas de cobertura: crotalária, feijão-de-porco, lablab, mucuna-cinza, milheto e vegetação espontânea; os tratamentos secundários são doses de N em cobertura na cultura de milho equivalentes a 0 e 120 kg ha⁻¹. Amostras de solo foram coletadas doze anos após o início do experimento, 30 dias após a dessecação das plantas de cobertura, nas entrelinhas da cultura do milho e nas camadas de 0 a 5; 5 a 10; 10 a 20 e 20 a 40 cm. Nelas foram determinados matéria orgânica, pH CaCl₂, P- resina, P orgânico total, P total e formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi) de P. As formas de P foram obtidas usando os seguintes extratores, em sequência: resina trocadora de ânions (P_{Resina}), soluções de NaHCO₃ (P_{bic}), NaOH (P_{NaOH}) e HCl (P_{HCl}), e mistura de H₂SO₄ + HF + H₂O₂. As formas obtidas foram classificadas em P lábil (P_{Resina} + P_{bic}), P moderadamente lábil (P_{NaOH}) e P não lábil. O cultivo de crotalária, lablab, feijão-de-porco, mucuna-cinza e milheto como plantas de cobertura em pré-safra de milho aumenta o P orgânico moderadamente lábil (P_{o NaOH l}) na camada superficial do solo. A adubação nitrogenada favorece a mineralização de Po no solo e redistribui as formas de Pi e Po entre os compartimentos lábeis e moderadamente lábeis, sem causar impacto no P disponível.

Palavras-chave: **Fracionamento de P, leguminosas, gramíneas, adubação nitrogenada**

ORGANIC AND INORGANIC-P FORMS AS AFFECTED BY COVER CROPS AND NITROGEN FERTILIZATION

ABSTRACT - Growing cover crops under no-tillage system and nitrogen fertilization can change the cycling and the accumulation of phosphorus in soil. The knowledge of the solubility, distribution and proportion of forms of P in soil can provide important information for assessing the availability of this element for plants and enable maximum efficiency of phosphate fertilizers use. With that, we aimed to evaluate, in a long term experiment, the effects of cover crops in pre-cropping corn, and sidedress nitrogen levels in corn, in the forms of soil phosphorus. The experiment was installed in a sandy clay Oxisol. The experimental design was randomized blocks with split plots and four replications. The main treatments were cover crops: *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Mucuna cinerea*, *Pennisetum americanum*, and spontaneous vegetation; the secondary treatments were sidedress N doses in corn, equivalent to 0 and 120 kg ha⁻¹. Organic matter, pH CaCl₂, P-resin, total organic P, total P, and organic (Po) and inorganic (Pi) forms of P were determined in samples collected twelve years after the start of the experiment in 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm layers. The P forms were obtained using the following extractants, in order: anion exchange resin (P_{Resin}), NaHCO₃ (P_{bic}), NaOH (P_{NaOH}) and HCl (P_{HCl}), and a mixture of H₂SO₄ + HF + H₂O₂. The obtained forms were classified as labile P (P_{Resin} + P_{bic}), moderately labile P (P_{NaOH}), and non-labile P. The cultivation of *Crotalaria juncea*, *Canavalia ensiformis*, *Dolichos lablab*, *Mucuna cinerea* and *Pennisetum americanum* as cover crops in corn pre-cropping increases moderately labile organic P (Po_{NaOH I}) in the topsoil. Nitrogen fertilization favors Po mineralization in soil and redistributes forms of Pi and Po between the labile and moderately labile compartments, without impacting available P.

Keywords: P fractionation, legumes, grasses, nitrogen fertilization.

1. INTRODUÇÃO

Em solos tropicais, a disponibilidade de fósforo é, na maioria das vezes, fator limitante da produtividade das culturas. A principal causa da baixa disponibilidade do elemento para as plantas é a grande estabilidade dos fosfatos na fase sólida do solo, decorrente da formação de compostos que se ligam com alta energia aos colóides, especialmente aos oxi-hidróxidos de Fe e Al, constituintes da fração argila que mais adsorvem P. Em consequência, nestes solos, têm-se baixa eficiência da adubação fosfatada e necessidade de aplicação de altas doses de fertilizantes para garantir a rentabilidade das culturas.

Tradicionalmente, os métodos de avaliação da fertilidade dos solos tropicais enfatizam as formas inorgânicas de P como indicadoras da disponibilidade deste nutriente para as plantas. Apesar disso, a participação das formas orgânicas na manutenção da disponibilidade de P tem se mostrado importante em muitas situações, sobretudo quando o manejo favorece o acúmulo de matéria orgânica (MO), como no sistema plantio direto (SPD). Nestes sistemas, o aumento do teor de MO contribui para o aumento da disponibilidade de P.

No SPD, a dinâmica das formas de P muda particularmente devido aos restos culturais que acumulam sobre o solo. Os processos envolvidos são: a mineralização do P dos tecidos das plantas; a produção de ácidos orgânicos no processo de decomposição da MO que competem com o P pelos sítios de adsorção; e o aumento do estoque de P na biomassa microbiana devido à maior atividade dos microrganismos nas camadas superficiais do solo.

Assim como o SPD, a adubação nitrogenada contribui para o aumento da adição de resíduos orgânicos ao solo e, conseqüentemente, interfere na ciclagem de P. No entanto, o efeito da adubação nitrogenada vai além do aumento na produção de biomassa vegetal. O N é um dos principais reguladores da população e da atividade microbiana do solo e pode aumentar a taxa de decomposição dos resíduos de plantas. Como parte do P que compõe os tecidos vegetais está em compostos orgânicos, a adubação nitrogenada deve acelerar a disponibilização de P.

O estudo da solubilidade, da distribuição e da proporção das formas de P do solo em função do cultivo de plantas de cobertura e de adubação nitrogenada pode fornecer informações úteis para a previsão da disponibilidade de P para as plantas

em sistemas nos quais este manejo é adotado, possibilitando a maximização da eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados, com adições mínimas e redução de perdas.

O objetivo com este trabalho foi avaliar os efeitos de plantas de cobertura em pré-safra de milho, e de doses de adubo nitrogenado em cobertura no milho, nas formas de P do solo, em experimento de longa duração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O P do solo ocorre em formas inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po), que contribuem em diferentes proporções para o P disponível. O Pi compreende o íon fosfato na solução do solo (P-solução), todas as formas precipitadas com Al^{3+} , Fe^{2+} e Ca^{2+} e adsorvidas aos oxi-hidróxidos de Fe e de Al da fração argila e, ainda, as formas estruturais dos minerais fosfatados (GATIBONI et al., 2013). O Po é originado dos resíduos vegetais, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (MARTINAZZO et al., 2007) e pode constituir cerca de 5 a 80% do P total do solo. As principais formas de Po são os fosfatos de inositol (10-80% do Po total), os fosfolipídeos (0,5-7%), os ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres-fosfato (>5%) (DALAL, 1977).

Na solução do solo, o P ocorre nas formas aniônicas, H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} , cujas concentrações variam em função do pH. Em regiões tropicais, onde prevalecem os solos ácidos, o P da solução ocorre quase que exclusivamente na forma de H_2PO_4^- (HAVLIN et al., 2005). O P em solução é mantido pelo P adsorvido na superfície das partículas sólidas do solo ou oriundo da dissolução de minerais primários e da decomposição da MO. O equilíbrio entre o P-solução e o P-sólido é dependente da concentração dos íons fosfato na solução, da quantidade de P na fase sólida e da resistência do solo em desorver P [fator intensidade (I), fator quantidade (Q) e fator capacidade de P ou poder tampão (Q/I), respectivamente] (NOVAIS et al., 2007).

Do ponto de vista da fertilidade do solo, independentemente da natureza química, a disponibilidade de P é classificada de acordo com a facilidade de reposição de íons fosfato na solução do solo. Assim, o conjunto de compostos capazes de repor P rapidamente na solução do solo, quando este é absorvido por plantas ou microrganismos, representa a fração lábil de P (P-lábil). Os compostos de baixa solubilidade, precipitados ou fixados, formas muito pouco ou nada reversíveis, representam a fração não-lábil de P (P-não lábil) (NOVAIS et al., 2007).

De modo semelhante ao que ocorre com as formas inorgânicas de P do solo, as formas orgânicas apresentam componentes com caráter variável entre lábil e não lábil, dependendo da estabilidade dos compostos e de sua interação com a fração mineral (NOVAIS et al., 2007).

A classificação das formas de P de acordo com labilidade é arbitrária, pois dependendo da taxa de absorção de P pela planta, pode-se considerar uma forma como lábil ou não lábil (GATIBONI et al., 2007). Esta divisão é, na verdade, uma ferramenta didática para esclarecer que existem compartimentos de P no solo com maior ou menor capacidade de suprimento à solução do solo (GATIBONI et al., 2013).

Nos solos tropicais, altamente intemperizados, o P predomina nas formas inorgânicas ligadas à fração mineral (P-adsorvido) e nas formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente (SANTOS et al., 2008). A adsorção de fosfato aos óxidos de Fe e Al ocorre através da troca de ligantes, processo no qual os grupos $-OH$ e $-OH_2^+$ ligados monocoordenadamente aos metais Fe e Al são deslocados pelos íons $H_2PO_4^-$, formando um novo complexo de superfície. Essa reação, por ser predominantemente covalente, possui alta estabilidade e reduz, por conseguinte, a solubilidade de P. A consequência disso é a retenção de grande parte de P adicionado ao solo por meio de adubação mineral. Estima-se que apenas 10 a 20% do P aplicado na forma de fertilizantes fosfatados seja disponibilizado para as culturas (VU et al., 2008). Isso implica, na prática, ao contrário dos demais nutrientes, na necessidade de uso de grandes quantidades de P na adubação para promover alguma saturação do elemento no solo e originar um excedente capaz de suprir as exigências nutricionais das culturas (NOVAIS; SMYTH, 1999), o que torna o fornecimento de P parte expressiva do custo de produção (SILVA et al., 2011).

A baixa eficiência do uso de fertilizantes fosfatados, devido à característica fixadora de P dos solos tropicais, aliada à iminência de escassez de reservas minerais de P, cuja longevidade estimada é de 93 a 291 anos (FIXEN, 2010), são fatores que têm justificado a intensificação de pesquisas que buscam maneiras de utilizar o P eficientemente na agricultura. No entanto, a vulnerabilidade mercantil de países dependentes da importação de fertilizantes fosfatados, como o Brasil, que ocorre devido a concentração geográfica das reservas minerais de P e dos principais fornecedores de ácido sulfúrico, matéria-prima empregada na solubilização das rochas fosfáticas (BAVEYE, 2015), é mais uma forte motivação para buscar maior eficiência na adubação fosfatada.

O uso de sistemas alternativos de manejo, como plantio direto, cultivo de plantas de cobertura e, ainda, utilização de esterco, compostos e resíduos em substituição a parte dos adubos minerais, apresenta resultados satisfatórios no aumento da eficiência da adubação fosfatada (TOKURA et al., 2002; MATOS et al., 2006; GATIBONI et al., 2007; REDEL et al., 2007; GATIBONI et al., 2008; PARTELLI et al., 2009; SILVA et al., 2011; QIAO, 2012).

De modo geral, as mudanças na dinâmica das formas de P inorgânico e orgânico do solo dependerão do sistema de manejo de solo, da quantidade de P exportado na colheita, da taxa de reposição do P exportado do sistema e da habilidade das plantas em utilizar as reservas de P nas formas menos lábeis (TIECHER et al., 2012 a,b).

Para o estudo da dinâmica de P em função do manejo, envolvendo o acúmulo e a dessorção do elemento segundo sua labilidade, muitos autores têm utilizado a técnica de fracionamento proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) (GATIBONI et al., 2007; SOUZA et al., 2007; GATIBONI et al., 2008; GONÇALVES; MEURER, 2009; TIECHER et al., 2012 a,b). Com este método extraem-se formas de P_i e P_o do solo, das mais disponíveis às mais estáveis, com o uso sequencial de soluções de força de extração crescente para diferentes formas de P (GATIBONI et al., 2013).

A primeira extração no esquema de fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) é feita com resina trocadora de ânions (RTA), e nela são extraídas formas lábeis de P_i (P_{iRTA}). Em seguida é usada solução de $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 8,5 que também extrai formas lábeis de P_i e P_o (P_{ibic} e P_{obic}). O P extraído por esses extratores está em formas que contribuem ativamente para o fornecimento do nutriente às plantas ou para sua transferência no ambiente, pelas águas de deflúvio ou de percolação (GATIBONI et al., 2007). Na sequência, o P é extraído com solução de $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ($P_{iNaOH I}$ e $P_{oNaOH I}$). Nesta etapa, extraem-se o P_i ligado aos óxidos e às argilas silicatadas com energia de ligação intermediária, e o P_o de formas moderadamente lábeis ligadas aos ácidos húmicos.

Após a extração com $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, é feita extração com solução de HCl 1 mol L^{-1} , que extrai P_i contido nos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvido aos colóides. Conforme modificação de Condrón e Goh (1989), a extração seguinte é

feita com solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹ (Pi_{NaOH II} e Po_{NaOH II}). O extrator NaOH 0,5 mol L⁻¹ dissolve formas orgânicas e inorgânicas de P similares às extraídas pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹, mas a solução de menor força não extrai o P que está fisicamente protegido no interior de microagregados (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Assim, a utilização da solução com concentração maior, aliada ao tempo de agitação, complementa a extração iniciada pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹ (CONDRON, GOH e NEWMAN, 1985).

O processo de fracionamento é finalizado com digestão do solo com H₂SO₄ e H₂O₂. Nesta etapa, extrai-se o P residual inorgânico + orgânico (P_{Residual}) do solo, caracterizado por formas recalcitrantes de P, que não contribuem para a nutrição das plantas a não ser em situações de extrema deficiência no solo (GATIBONI et al., 2005).

A participação das formas inorgânicas e orgânicas na manutenção da disponibilidade de P para as plantas foi determinada por Tiessen et al. (1984). Segundo os autores, em solos pouco desenvolvidos, 86% da variabilidade do P extraído por RTA foi proveniente das formas inorgânicas, enquanto em solos mais intemperizados, 80% foi controlada pela mineralização das formas orgânicas, especificamente aquelas extraídas com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (Po_{bic}). Guerra et al. (1996) observaram que o Po lábil (extraído por NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹) correspondeu a mais de 60% da fração lábil em solos intemperizados do Brasil Central. Da mesma forma, Gatiboni et al. (2007) relataram que, em solos adubados, a contribuição do Po para o P absorvido pelas plantas foi de 46,4%, e aumentou para 75,1% no solo sem adição de fertilizantes minerais. Assim, em solos intemperizados ou deficientes em P, o papel das formas orgânicas do elemento na definição da fração disponível é muito relevante (TIECHER et al., 2012b).

De modo geral, quando o manejo inclui adição de resíduos orgânicos e fertilizantes ao solo, há o aumento das formas orgânicas de P. De modo oposto, em sistemas intensivos de cultivo, com baixa reposição de P, tem-se diminuição do Po (REDDY; SUBBARAO; RUPA, 2000).

O revolvimento do solo, como acontece no sistema de cultivo convencional (SCC), faz com que haja exposição de novos sítios de adsorção, contribuindo para retenção de P com maior energia (SANTOS, 2009), o que não ocorre em SPD. Há

relatos de que sistemas de manejo que promovem aumento de MO no solo, como o SPD, contribuem para o incremento de formas mais lábeis de P, pois os ácidos orgânicos, oriundos da decomposição da MO, bloqueiam sítios de adsorção por recobrimento dos óxidos de Fe e de Al (REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008).

Outros efeitos do SPD podem ser causados pelo aumento da atividade microbiana nas camadas superficiais do solo, o que resulta na formação de um estoque de P microbiano, ao mesmo tempo em que aumenta a liberação do P orgânico por meio da decomposição dos resíduos vegetais deixados em superfície (LOPES et al., 2004). Além disso, em solos altamente intemperizados sob SPD, há menor decomposição e liberação do P dos resíduos vegetais e da MO, e maior quantidade de P na biomassa microbiana do solo, fatores que previnem a rápida adsorção do P inorgânico pela fração mineral (MARTINAZZO et al., 2007). O contrário ocorre em SCC devido aos distúrbios físicos resultantes do revolvimento do solo. No SCC há maior taxa de decomposição do resíduo e, por conseguinte, a conversão mais rápida dos compostos orgânicos lábeis e do P armazenado na biomassa microbiana a P inorgânico (TAKEDA et al., 2009).

As plantas de cobertura, além de oferecerem proteção ao solo contra agentes climáticos, apresentam potencial para manter ou elevar o teor de MO e, posteriormente, mobilizar e reciclar nutrientes (SILVA et al., 2011). A manutenção da ciclagem de nutrientes é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos e, no caso do P, cerca de 77 e 79% do total do nutriente nas folhas e raízes mortas, respectivamente, ficam disponíveis para o crescimento das plantas cultivadas após o cultivo da cultura de cobertura (BORKERT et al., 2003). Nesse sentido, como a quantidade de MO no solo resulta, em parte, do balanço entre as taxas de adição e de decomposição de material orgânico, a adoção de práticas que favoreçam a produção de resíduos vegetais é muito importante. Segundo Sousa et al. (2004), a implantação de sistema de rotação de culturas incluindo espécies com alta eficiência em extrair e utilizar P pode permitir o maior aproveitamento do P do solo e contribuir para alcançar alta eficiência agronômica na adubação fosfatada.

A escolha da planta de cobertura baseia-se em características que incluem alta produção de fitomassa (CRUSCIOL et al., 2005), alta eficiência no uso de nutrientes, especialmente N e P (GAMA RODRIGUES et al., 2007), rusticidade, alta

tolerância ao déficit hídrico (PACHECO et al., 2008), controle de pragas e doenças, efeito alelopático sobre plantas daninhas, crescimento inicial rápido com fácil estabelecimento e controle, além de baixa taxa de decomposição (alta relação C/N) (CRUSCIOL et al., 2005; BOER et al., 2007; TORRES et al., 2008). No entanto, se por um lado é interessante que as espécies escolhidas produzam grande quantidade de fitomassa e tenham decomposição lenta para manutenção da cobertura morta no SPD, por outro, a presença de materiais de fácil decomposição garante liberação de nutrientes para a cultura seguinte.

Em regiões tropicais, onde a taxa de decomposição dos resíduos é alta, pesquisadores têm somado esforços para definir sistemas de cultivo que integrem a produção de resíduos em quantidade e qualidade adequadas para promoverem cobertura e proteção do solo por maior período de tempo, ao mesmo tempo em que proporcionem reciclagem de nutrientes, de maneira a disponibilizá-los de acordo com a demanda da cultura em sucessão (TORRES et al., 2008).

As gramíneas são bastante utilizadas como plantas de cobertura, com destaque para o milheto (*Pennisetum americanum*). Sua utilização se deve à resistência ao déficit hídrico, elevada produção de biomassa e menor custo das sementes (SILVA et al., 2006). Por outro lado, as leguminosas se destacam pela capacidade intrínseca em aproveitar o N atmosférico, pela elevada produção de biomassa e relação C/N menor, favorável à decomposição (SILVA; DELATORRE, 2009). Entre as leguminosas destacam-se: crotalária (*Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*), mucunas cinza e preta (*Mucuna nivea* e *Mucuna aterrima*, respectivamente), lablab (*Dolichos lablab*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e guandu-anão (*Cajanus cajan*) (TORRES et al., 2005; CARNEIRO et al., 2008).

Tiecher et al. (2012a), avaliando a dinâmica de P em SPD e SCC com cultivo de espécies de inverno em sequência às culturas de soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*), observaram que a aveia-preta (*Avena strigosa*) e o tremoço-azul (*Lupinus angustifolius*) cultivados em SPD foram mais eficientes na ciclagem de P em comparação a ervilhaca-peluda (*Vicia villosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), trigo (*Triticum aestivum*) e vegetação espontânea, aumentando o teor de Pi lábil no solo nas camadas superficiais. Os autores concluíram que, em SPD, a maior parte do fosfato aplicado via fertilizantes foi convertida em formas orgânicas pelas plantas

e pela biomassa microbiana do solo, ao invés de ser adsorvido pela fração mineral do solo.

A habilidade das plantas em ciclar o P também merece destaque, pois elas possuem diferentes graus de adaptação para acessar o P do solo, como alterações na morfologia das raízes (densidade, comprimento, diâmetro, raízes capilares), associações micorrízicas, alterações no pH da rizosfera e exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, características que podem variar entre as espécies vegetais (WANG et al., 2008; RICHARDSON et al., 2009). Assim, algumas espécies aproveitam o P_i através das raízes ou associações com micorrizas e outras utilizam P_o através de mecanismos enzimáticos especializados para cada tipo de éster de fosfato que é utilizado como fonte do nutriente (TURNER, 2008). Essas adaptações alteram processos de dissolução/precipitação, adsorção/dessorção, transporte por difusão, contato solo/raiz e mineralização do P (HORST et al., 2001).

A adubação nitrogenada é um dos fatores relacionados ao manejo que contribui para o aumento da adição de resíduos ao solo e conseqüentemente para a ciclagem de P. Santi et al. (2003), avaliando influência de doses de adubo nitrogenado na produção de fitomassa, quantidade de nutrientes acumulados (N, P, K, Ca e Mg) e relação C/N dos resíduos produzidos pela cultura da aveia-preta, verificaram que com aplicação de 120 kg ha^{-1} de N-ureia, a quantidade de P ciclada pela fitomassa da aveia-preta atenderia 1/3 da demanda de P para produção de $7,9 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos de milho. Com esta dose de N houve aumento de $3,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de P na biomassa em relação ao tratamento sem adubação nitrogenada, representando incremento de 68% da ciclagem máxima obtida. Para a maior dose (240 kg ha^{-1} de N), o aumento foi de 70% no acúmulo de P quando comparado ao tratamento sem adubação nitrogenada.

Além de promover maior produção de matéria seca em SPD, a disponibilidade de N estimula o desenvolvimento e a atividade radicular, aumentando a absorção de nutrientes (SILVA; DELATORRE, 2009; COSTA et al., 2011). Há, inclusive, aumento na produção de matéria seca de raízes que, dependendo da cultura, pode variar de 25 a 60% (MALHI et al., 2006). Como o P movimenta-se no solo por difusão, característica que o qualifica como elemento pouco móvel, a interceptação radicular,

por meio do maior desenvolvimento das raízes, é importante porque permite melhorar a exploração e absorção de P no solo pelas plantas (LAMBERS et al., 2008; VU et al., 2008; WANG et al., 2008).

O uso do N na adubação também influencia a população e a atividade microbiana no solo, o que reflete no aumento da taxa de decomposição dos resíduos vegetais. Como o P encontra-se associado a compostos orgânicos no tecido vegetal, o processo de decomposição pelos microrganismos do solo é fundamental para sua mineralização e disponibilização (TURNER, 2008; KELLER et al., 2012).

Assis et al. (2003) relataram que a aplicação de N sobre a palhada de sorgo, em área sob SPD por 4 anos, aumentou em 21% o processo de decomposição da palha em comparação ao tratamento sem N. Na presença de N foram necessários 119 dias para ocorrer a decomposição de 50% da palha enquanto que, na ausência, houve necessidade de 150 dias.

Santi et al. (2003) verificaram diminuição de 44% da relação C/N na aveia-preta na maior dose de N aplicada (240 kg ha^{-1} de N) em comparação àquela obtida na ausência da adubação nitrogenada. Com isto, a relação C/N da aveia adubada com N aproximou-se do valor crítico ($\text{C/N} = 25$), citado como limite entre os processos de imobilização e mineralização de N. Esses resultados, segundo os autores, sugerem que a adubação nitrogenada pode ser uma estratégia para melhorar a sincronia entre a disponibilização de nutrientes pelo resíduo e a absorção pelas plantas e, assim, aumentar a eficiência na ciclagem de nutrientes.

Medidas das alterações nas formas de P feitas após nove anos de aplicações anuais de 100 kg ha^{-1} de N permitiram constatar diminuição de formas orgânicas moderadamente lábeis de P, devido ao aumento na taxa de mineralização, e aumento de formas inorgânicas moderadamente lábeis, devido à diminuição no valor de pH e ao aumento na quantidade de P absorvida pelas plantas. Embora processos associados a aumento (mineralização) e diminuição (adsorção) de disponibilidade tenham ocorrido de forma simultânea, no balanço, houve diminuição na quantidade de P disponível (YANG et al., 2014).

Pelo exposto, existem diversos fatores que interferem nas formas em que o P pode ser armazenado no solo e as plantas diferem em sua capacidade de obtê-lo a partir delas. No entanto, a dinâmica e o tamponamento dessas formas de P na

solução do solo e a correlação com o P absorvido pelas plantas ainda é um assunto complexo e pouco compreendido (GATIBONI et al., 2013).

Por meio do fracionamento de P proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), a dinâmica do P no solo tem sido estudada considerando efeitos de culturas, sistemas de manejo e solos. Destes estudos tem resultado a confirmação de que as formas que mais participam do P disponível são o P extraído por RTA e o P_i extraído por solução de NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982; TIESSEN et al., 1984; STEWART; TIESSEN, 1987; GATIBONI et al., 2007; GONÇALVES; MEURER, 2009).

Gonçalves (2007) observou coeficientes de correlação de $0,94^{**}$ e $0,73^{**}$ entre o P acumulado nas plantas de arroz (*Oryza sativa*) e as formas de P extraídas pela RTA e pela solução de NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, respectivamente. Do mesmo modo, Mariano et al. (2002) obtiveram coeficiente de correlação de $0,95^{**}$ entre o P acumulado pelo arroz e o P extraído por NaHCO_3 de quatro solos de várzea.

No entanto, em solos altamente intemperizados ou sem adubação, as formas de P de labilidade intermediária (P_i e P_o_{NaOH}) são relativamente dinâmicas e abastecem o P-solução (TIESSEN et al., 1992; NOVAIS; SMITH, 1999). Além disso, tem sido demonstrado que quando a quantidade de P adicionada ao solo excede o removido pelas culturas, ele se acumula principalmente nessas formas (KUO et al., 2005; GATIBONI et al., 2007, 2008; TAKEDA et al., 2009; VU et al., 2008; WANG et al., 2010). Conte et al. (2003) verificaram que o aumento da dose de P aplicada em SPD diminuiu linearmente a participação do P orgânico em relação ao P total. Segundo os autores, o P aplicado acumulou principalmente nas formas inorgânicas e não alterou o teor de P orgânico e de carbono orgânico total. Souza et al. (2007) verificaram que, independentemente da aplicação de esterco bovino, as formas de P pouco lábeis, P_o ligado a compostos húmicos (P_o_{NaOH}) e P_i ligado a Fe e Al ($P_{i\text{NaOH}}$), foram as formas que apresentaram maior contribuição no tamponamento do P-solução. Gatiboni et al. (2008) relataram que a adição de dejetos líquidos de suíno ao solo provocou acúmulo de P nas formas inorgânicas lábeis, extraídas com RTA e NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, e de labilidade intermediária, extraídas com NaOH $0,1$ e $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, sendo a primeira a principal forma de acumulação de P.

Tiecher et al. (2012a) verificaram que a aplicação de fertilizantes fosfatados na linha de semeadura no SPD promoveu aumento do teor de P inorgânico nas camadas superficiais, nas formas lábeis e moderadamente lábeis. Segundo os autores, o cultivo de plantas com grande produção de biomassa, como aveia-preta, e de plantas capazes de obter P de formas de menor labilidade, como tremoço-azul, em SPD, aumenta o teor de P inorgânico lábil no solo das camadas superficiais, devido a maior quantidade de P reciclado, não ocorrendo o mesmo resultado quando da incorporação dos resíduos culturais no SCC. Os autores explicaram que após ser mineralizado, o P dos resíduos culturais incorporados segue a mesma rota de adsorção do P em solução, sendo retido com forte energia de ligação nesse sistema.

Maior atenção tem sido dada às formas de P orgânico extraído pelas soluções de NaHCO_3 e de NaOH , já que elas podem ser mineralizadas e disponibilizadas para as plantas em curto e médio prazos. Todavia, essa relação depende, entre outros fatores, do tipo de solo e da qualidade do resíduo da planta cultivada. Nesse sentido, Rheinheimer e Anghinoni (2003) constataram que o teor de P orgânico extraído por NaHCO_3 no solo cultivado com aveia/milho foi menor do que no solo cultivado com aveia+ervilhaca/milho+caupi (*Vigna unguiculata subs unguiculata*) e guandu (*Cajanus cajan*)/milho, possivelmente devido à baixa qualidade dos resíduos obtidos na sucessão com gramíneas. González-Chávez et al. (2010) verificaram que o uso do sistema de rotação sorgo (*Sorghum* spp) - trigo - soja aumentou a quantidade de P armazenado na biomassa microbiana, principalmente em SPD, comparado ao cultivo contínuo de trigo.

Por meio do fracionamento de P é possível propor a dinâmica de tamponamento das formas P no solo com o P-solução, a partir da absorção pelas plantas. Com base na literatura tem-se que as formas de P_i lábeis ($\text{P}_{i\text{RTA}}$ e $\text{P}_{i\text{bic}}$) e de labilidade intermediária ($\text{P}_{i\text{NaOH}}$), num primeiro momento, sustentam a absorção pelas plantas. Ao mesmo tempo, a diminuição da disponibilidade de P_i no sistema estimula o processo de mineralização do P_o , que repõe os teores das formas inorgânicas. Quando ocorre diminuição da capacidade de sustentação das formas orgânicas e inorgânicas de labilidade intermediária, passam a ser tamponantes do sistema as formas mais recalcitrantes de P (P_{HCl} e $\text{P}_{\text{Residual}}$). No entanto, durante

esse processo, parte do P é readsorvido ao solo e parte é imobilizada pela biomassa microbiana. Assim, não há formas não-lábeis de P, pois a absorção pelas plantas desencadeia reações de reposição de formas lábeis que resultam da depleção do P_{Residual} , e isso leva a inferir que o conceito de labilidade está apenas associado a uma escala de tempo (GUO et al., 2000).

Com base no que foi apresentado, pode-se esperar que o uso de plantas de cobertura em SPD, com diferentes mecanismos de obtenção de P, e de adubação nitrogenada, podem melhorar a disponibilidade e ciclagem de P no solo e contribuir para a utilização mais eficiente da adubação fosfatada. Todavia, o efeito de diferentes preparos de solo e plantas cultivadas na dinâmica do P ainda permanece não totalmente esclarecido, especialmente em solos altamente intemperizados (TIECHER et al., 2012a,b; GATIBONI et al., 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, solo e clima

A área experimental está localizada na Fazenda de Ensino e Pesquisa da FCAV/Unesp, campus de Jaboticabal, região Centro-Norte do Estado de São Paulo, a 21° 15' 22" de latitude Sul e 48° 16' 42" de longitude Oeste. O solo da área é Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa (Santos et al., 2013), cultivado em plantio direto desde a safra 1998/99. O clima é Cwa, segundo o Sistema Internacional de Classificação de Köppen, a pluviosidade média anual é de 1.285 mm, concentrada, principalmente, de outubro a março, e a temperatura média anual é de 22,4°C (dados da Estação Agroclimatológica da FCAV/Unesp).

3.2 Histórico da área, tratamentos e delineamento experimental

O experimento do qual se originaram as amostras em que foi feito o fracionamento do P foi iniciado no segundo semestre de 2000. As características químicas e a granulometria do solo determinadas em amostra coletada na camada de 0 a 20 cm, em área total, antes da instalação do experimento, foram: P-resina, 58 mg dm⁻³; MO, 20 g dm⁻³; pH em CaCl₂, 4,5; K⁺, 3,1 mmolc dm⁻³; Ca²⁺, 13 mmolc dm⁻³; Mg²⁺, 6 mmolc dm⁻³; H+Al, 47 mmolc dm⁻³; CTC, 69 mmolc dm⁻³; V, 32%; argila, 474 g kg⁻¹; silte, 27 g kg⁻¹; e areia, 499 g kg⁻¹. Os métodos usados na caracterização química estão descritos em Raij et al. (2001) e a granulometria foi determinada pelo método da pipeta (DONAGEMA et al., 2011).

O experimento está instalado em delineamento em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e 4 repetições. Os tratamentos principais são 6 plantas de cobertura em pré-safra de milho: crotalária (*Crotalaria juncea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Dolichos lablab*), milheto (*Pennisetum americanum*), mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*) e vegetação espontânea (pousio). Os tratamentos secundários são 4 doses de adubo nitrogenado em cobertura no milho, equivalentes a 0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹, aplicado ao lado das plantas, aos 25-30 dias após a semeadura. As parcelas medem 18 m x 7 m e as subparcelas, 4,5 m x 7 m.

Em todos os anos, as plantas de cobertura foram semeadas em setembro ou outubro, sem adubação, dessecadas em dezembro ou janeiro e, em seguida, foi feita a semeadura do milho. A cultura do milho não é irrigada.

As amostras de solo nas quais se efetuou o fracionamento do P foram coletadas na safra 2012/2013, 12 anos após o início do experimento. Na safra 2012/2013, as plantas de cobertura foram semeadas em sistema plantio direto, em 19-10-2012. Todas as espécies foram semeadas com espaçamento de 0,50 m nas entrelinhas, e a quantidade de sementes por metro linear foi de 9; 9; 12; 8 e 20 para mucuna-cinza, crotalária, lablab, feijão-de-porco e milheto, respectivamente. As plantas de cobertura foram dessecadas no dia 07-01-2013. A semeadura direta do milho (híbrido BM 840 Pró) foi feita no dia 08-01-2013, utilizando o espaçamento de 0,90 m nas entrelinhas, totalizando cerca de 55.500 plantas ha⁻¹. Na semeadura, a adubação foi feita utilizando 28 kg ha⁻¹ de N, 98 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 56 kg ha⁻¹ de K₂O (350 kg ha⁻¹ da fórmula 08-28-16).

3.3 Coleta das amostras de solo e avaliações

A coleta das amostras de solo foi feita nos tratamentos crotalária, feijão-de-porco, lablab, milheto, mucuna-cinza e vegetação espontânea, nas subparcelas com 0 e com a dose intermediária de N em cobertura na cultura do milho (120 kg ha⁻¹ de N). A amostragem de solo foi feita trinta dias após a dessecação das plantas de cobertura e antes da adubação em cobertura no milho na safra 2012/2013, nas entrelinhas da cultura e nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, empregando trado tipo sonda.

As amostras foram secas ao ar e à sombra, passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha, homogeneizadas e submetidas às determinações de MO, pH CaCl₂ e P-resina segundo métodos descritos em Raij et al. (2001). Subamostras foram trituradas em almofariz e passadas em peneira com abertura de malha de 0,15 mm para quantificação de P orgânico total (SAUNDERS; WILLIAMS, 1955) e P total (KUO, 1996), e nelas foram determinadas as formas do P, segundo método descrito no item a seguir.

3.4 Fracionamento do fósforo

O fracionamento do P foi feito segundo método de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condon e Goh (1989), ou seja, em relação ao método original não foi feita determinação do P na biomassa microbiana e a dispersão do solo por ultra-som foi substituída pelo uso de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹. Os procedimentos comuns a todas as formas foram: uso de tubos de centrifuga de 50 mL; agitação das suspensões em agitador circular-horizontal a 220 rpm; centrifugação a 8.000-10.000 rpm por 5-8 min; ressuspensão dos sedimentos, entre cada extração, usando 10 mL de solução de NaCl 0,5 mol L⁻¹, conforme sugerido por Gatiboni et al. (2013), e agitador tipo Vórtex; transferência do extrato mais a solução de lavagem para o mesmo balão volumétrico, completando o volume com água desionizada; determinação de P nos extratos pelo método de Murphy e Riley (1962). A descrição do método está a seguir e o resumo está na Figura 1.

3.4.1 Pi extraído por resina trocadora de ânions e Po solúvel em água

Para tubos de centrifuga foram transferidos 1,0 g de solo seco, 20 mL de água deionizada e uma lâmina de RTA (AMI-7001, Membranes International®), com 2,0 cm x 2,5 cm (5 cm² de resina por grama de solo), previamente saturada com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ pH 8,5. A suspensão foi submetida a agitação por 16 h, a resina foi retirada com auxílio de pinça, lavada com volume mínimo de água desionizada e colocada em frasco com 30 mL de solução de HCl 0,5 mol L⁻¹. A resina foi mantida em repouso na solução de HCl por 90 min e depois as amostras foram submetidas a agitação por 30 min para extração do Pi-RTA (extrato A). Após o uso, as lâminas de resina foram mantidas em água para posterior recuperação.

O Po no sobrenadante após a extração de Pi com resina não é quantificado no procedimento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), mas fez-se a opção por quantificá-lo porque, mesmo sendo pequeno, é a fração do Po mais solúvel, portanto mais sujeita a degradação microbiana e disponibilização para as plantas. Esta fração foi designada Po_{H2O}. Na obtenção desta fração, a suspensão solo-água foi centrifugada, o sobrenadante foi transferido para balão volumétrico de 50 mL e o volume foi completado com água deionizada (extrato B). Uma alíquota de 10 mL do extrato B foi transferida para tubo de digestão, ao qual foram adicionados 0,25 g de

persulfato de potássio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) e 3 mL de solução de H_2SO_4 2,5 mol L^{-1} , segundo método de Bowman (1989) modificado por Thien e Myers (1992). Os tubos foram aquecidos a 150°C durante 30 min, em bloco digestor, para eliminar o excesso de H_2O_2 formado na dissolução do $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ em meio ácido. O sedimento foi reservado (sedimento A) para a próxima extração.

Na quantificação do $\text{P}_{\text{i RTA}}$ e do $\text{P}_{\text{o H}_2\text{O}}$ foi adotado o método de Murphy e Riley (1962). Para copos de plástico descartáveis com capacidade para 50 ml foram transferidos 5 mL dos extratos A e B, e o valor de pH dos extratos foi corrigido através da adição de 5 gotas de p-nitrofenol (indicador) e, em seguida, de solução de NaOH 5,0 mol L^{-1} até viragem do indicador de incolor para amarelo. Em seguida foram adicionados 10 mL de água desionizada e 1 mL de solução de H_2SO_4 2,5 mol L^{-1} , contendo 15,35 g L^{-1} de molibdato de amônio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), 0,3511 g L^{-1} de tartarato de antimônio e potássio ($\text{C}_8\text{H}_4\text{K}_2\text{O}_{12}\text{Sb}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e 5,28 g L^{-1} de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$). Após 20 min de reação foi feita leitura em espectrofotômetro a 880 nm.

3.4.2 P_{i} e P_{o} – NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} (P_{ibic} e P_{obic})

Para determinar o P_{ibic} e o P_{obic} foram adicionados 20 mL de solução de NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} pH 8,5 ao tubo de centrífuga com o sedimento A e a suspensão foi agitada por 16 h e centrifugada. O sobrenadante foi transferido para balão volumétrico de 50 mL, para o qual foi também transferida a solução de lavagem, e o volume foi completado com água deionizada (extrato C). Em alíquota de 5 mL do extrato C sem digerir foi determinado o P_{ibic} e, em outra, foi feita digestão, como na fração anterior. No extrato digerido foi feita determinação do P total lábil extraído com NaHCO_3 (P_{tbic}) e o P_{obic} foi obtido pela diferença entre P_{tbic} e P_{ibic} . O sedimento resultante (sedimento B) foi reservado para a próxima extração.

3.4.3 P_{i} e P_{o} – NaOH 0,1 mol L^{-1} ($\text{P}_{\text{NaOH I}}$ e $\text{P}_{\text{NaOH II}}$)

Ao tubo com o sedimento B foram adicionados 20 mL de solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} e a suspensão foi agitada por 16 h e centrifugada. O sobrenadante foi transferido para balão volumétrico de 50 mL, para o qual foi também transferida a solução de lavagem, e o volume foi completado com água deionizada (extrato D).

Alíquota de 5 mL do extrato D foi transferida para tubo de centrífuga de 50 mL, acidificada com solução de HCl 8 mol L⁻¹ até pH 1,0 – 1,5 e centrifugada a 2.500 rpm para precipitar os ácidos húmicos (KOVAR; PIERZYNSKI, 2009) (extrato E). Em seguida, o extrato E foi transferido para copo de plástico descartável com capacidade para 50 mL para determinação do $P_{iNaOH I}$. Alíquota de 10 mL do extrato D foi submetida à digestão, e, no extrato digerido foi feita determinação de P total extraído com NaOH 0,1 mol L⁻¹ ($P_{tNaOH I}$). O $P_{oNaOH I}$ foi determinado pela diferença entre o $P_{tNaOH I}$ e o $P_{iNaOH I}$. O sedimento foi reservado (sedimento C) para a próxima extração.

3.4.4 P_i – HCl 1,0 mol L⁻¹ (P_{iHCl})

Ao tubo com o sedimento C foram adicionados 20 mL de solução de HCl 1,0 mol L⁻¹, a suspensão foi agitada por 16 h, centrifugada e o sobrenadante foi transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato F). A lavagem foi feita como descrito nos procedimentos gerais. Em alíquota de 5 mL do extrato E foi determinado o P_{iHCl} . Desta fração resultou o sedimento D.

3.4.5 P_i e P_o – NaOH 0,5 mol L⁻¹ ($P_{iNaOH II}$ e $P_{oNaOH II}$)

Para extração de $P_{iNaOH II}$ e $P_{oNaOH II}$ foram adicionados, ao tubo com o sedimento D, 20 mL de solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹. A suspensão foi agitada por 16 h, centrifugada e o sobrenadante foi transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato G). O sedimento foi lavado conforme já descrito e em alíquota de 5 mL do extrato F sem digerir foi feita a determinação do P_i -NaOH II e, em outra alíquota de 10 mL foi feita digestão como descrito na fração P_{oH_2O} (item 3.4.1). No extrato digerido foi feita determinação de P total extraído com NaOH 0,5 mol L⁻¹ ($P_{tNaOH II}$). O $P_{oNaOH II}$ foi obtido pela diferença entre $P_{tNaOH II}$ e $P_{iNaOH II}$. O sedimento (sedimento E) foi empregado na próxima extração.

3.4.6 P residual ($P_{residual}$)

Para determinar o $P_{residual}$, o sedimento E foi transferido para placa de Petri, seco em estufa, pesado, triturado em almofariz e, em subamostra de 0,5 g foi aplicado o procedimento de determinação de P total (KUO, 1996).

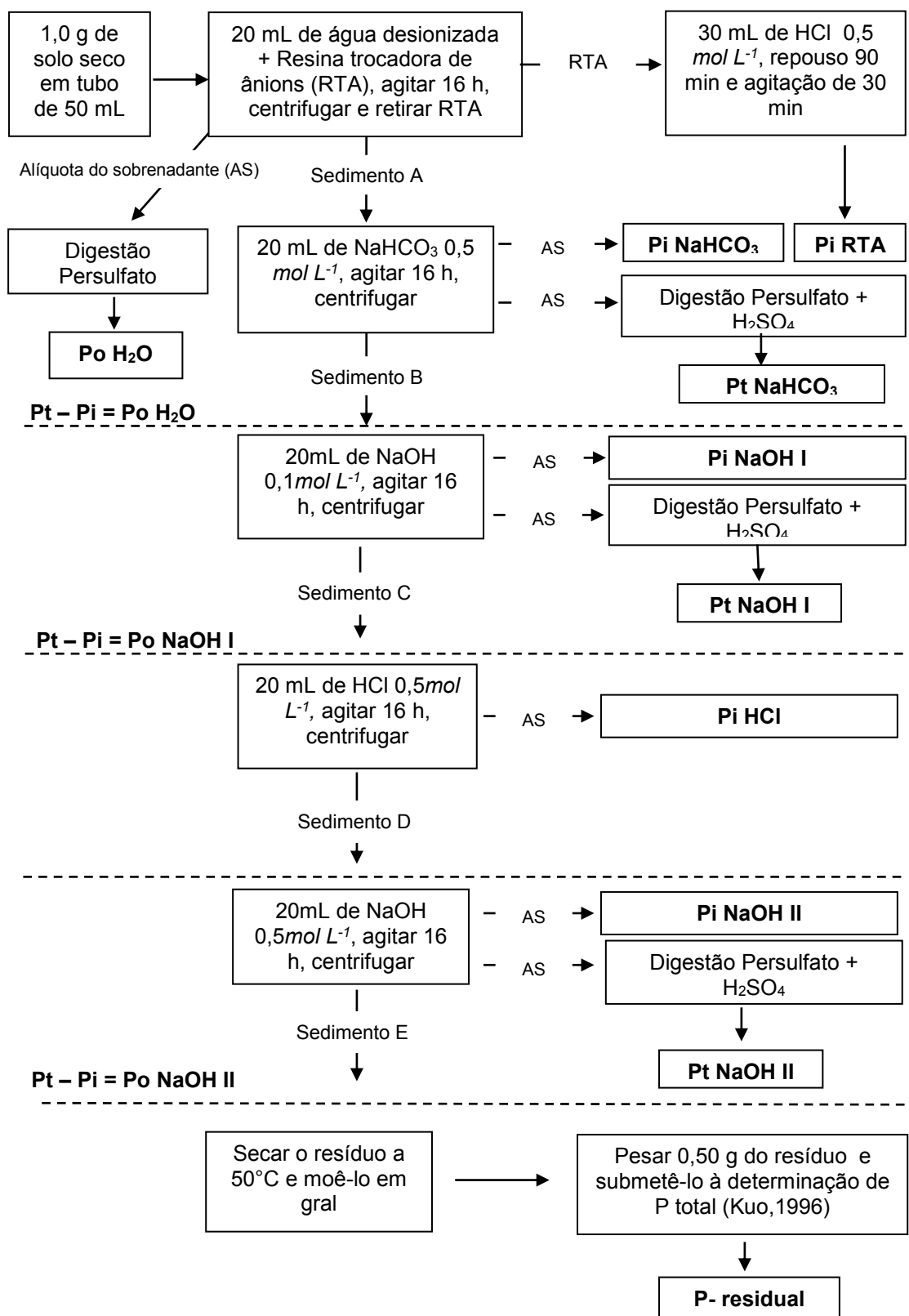


Figura 1. Esquema de fracionamento para P em amostras de solo (HEDLEY, STEWART; CHAUHAN, 1982, modificado por CONDRON; GOH, 1989 e GATIBONI et al., 2013).

3.5 Forma de análise dos resultados

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados segundo esquema fatorial e delineamento em blocos ao acaso com 4 repetições, considerando as plantas de cobertura como tratamentos principais, nas parcelas, e as doses de N como tratamentos secundários, nas subparcelas. Foi aplicada análise de variância (teste F) e, em caso de efeito significativo de tratamentos, as médias foram comparadas por teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Foram feitos testes de correlação linear simples entre as formas de P, o teor de MO, o P_{Resina} , o $P_{\text{O Total}}$ e P_{Total} .

A acurácia do fracionamento de P foi determinada por meio de correlação entre os teores totais de P obtidos pela soma das formas e o P total determinado pelo método de Kuo (1996).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fósforo total, disponível e orgânico total

O cultivo de espécies leguminosas e gramíneas em cobertura e o pousio não causaram variação nos teores de fósforo total (P_{Total}), fósforo orgânico total ($P_{o\ Total}$) e fósforo disponível (P_{Resina}) no solo em nenhuma das profundidades avaliadas (Tabelas 1 a 4).

Tabela 1. Teores de fósforo total, disponível (P_{Resina}) e orgânico em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 0 a 5 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P_{Total} mg kg ⁻¹ -----						
0	744,00	747,00	765,49	731,00	678,50	717,75	740,58
120	756,50	715,00	702,75	792,00	727,75	723,50	736,25
Média	750,25	731,00	734,12	761,50	703,12	720,62	
	----- P_{Resina} mg kg ⁻¹ -----						
0	40,25	34,00	75,00	50,50	49,50	44,00	48,87 a ¹
120	37,00	25,00	41,00	35,50	40,00	44,00	37,08 b
Média	38,62	29,50	58,00	43,00	44,75	44,00	
	----- $P_{o\ Total}$ mg kg ⁻¹ -----						
0	226,25	221,00	189,50	222,00	209,75	212,25	213,45a
120	179,75	174,75	173,75	178,25	174,00	178,25	176,45b
Média	203,00	197,87	181,62	200,12	191,87	195,25	
	P_{Total}		P_{Resina}		$P_{o\ Total}$		
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	
Plantas de cobertura (PC)	0,54 ^{ns}	11,02	1,83 ^{ns}	45,16	0,67 ^{ns}	13,40	
Doses de N (N)	0,40 ^{ns}	7,28	6,51*	37,25	24,99**	13,15	
PC x N	1,36 ^{ns}		1,14 ^{ns}		0,42 ^{ns}		

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ² ns: não-significativo. *: significativo a 1 % de probabilidade **: significativo a 5 % de probabilidade.

Tabela 2. Teores de fósforo total, disponível (P_{Resina}) e orgânico em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 5 a 10 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P_{Total} mg kg ⁻¹ -----						
0	710,25	756,75	827,75	717,75	699,25	736,50	741,37
120	753,00	685,50	749,75	760,25	747,75	706,25	733,75
Média	731,62	721,12	788,75	739,00	723,50	721,37	
	----- P_{Resina} mg kg ⁻¹ -----						
0	53,75	55,00	78,75	47,00	52,25	51,25	56,33
120	47,00	24,75	46,00	52,75	47,00	54,00	45,25
Média	50,37	39,87	62,37	49,87	49,62	52,62	
	----- $P_{\text{O Total}}$ mg kg ⁻¹ -----						
0	185,75	203,75	218,75	183,25	196,25	190,25	196,33 a ¹
120	158,75	164,50	168,25	180,25	164,50	166,25	167,08 b
Média	172,25	184,12	193,50	181,75	180,37	178,25	
	P_{Total}		P_{Resina}		$P_{\text{O Total}}$		
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	
Plantas de cobertura (PC)	0,58 ^{ns}	13,13	0,79 ^{ns}	45,13	0,50 ^{ns}	15,44	
Doses de N (N)	0,09 ^{ns}	12,25	1,59 ^{ns}	59,89	6,79*	21,40	
PC x N	0,87 ^{ns}		0,59 ^{ns}		0,34 ^{ns}		

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. * *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade.

A aplicação de N não causou efeito nos teores de P_{Total} , porém resultou em diminuição nos teores de P_{Resina} e $P_{\text{O Total}}$. Em solos nos quais não há perdas por lixiviação, e considerando que a remoção pelas colheitas é pequena, não há expectativa de alterações significativas no P_{Total} em função dos fatores em estudo. Takeda et al. (2009) comentaram que todo o P absorvido por plantas de cobertura é reciclado e não interfere no balanço de P total da área e que, mesmo após 5 anos de cultivo com soja, com estimativa de remoção pela cultura de 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P não houve alterações no P_{Total} do solo.

Tabela 3. Teores de fósforo total, disponível (P_{Resina}) e orgânico em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 10 a 20 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P_{Total} mg kg ⁻¹ -----						
0	697,75	717,00	804,75	693,00	728,00	687,00	721,25
120	666,75	687,50	702,00	741,50	710,00	715,75	703,91
Média	682,25	702,25	753,37	717,25	719,00	701,37	
	----- P_{Resina} mg kg ⁻¹ -----						
0	51,75	36,00	66,75	50,75	44,00	41,00	48,37
120	34,00	22,75	41,50	35,50	42,50	44,25	36,75
Média	42,87	29,37	54,12	43,12	43,25	42,62	
	----- P_o Total mg kg ⁻¹ -----						
0	163,75	179,00	226,75	185,00	194,00	178,00	187,75 a
120	158,75	168,75	159,75	167,00	158,00	162,25	162,41 b
Média	161,25	173,87	193,25	176,00	176,00	170,12	
	P_{Total}		P_{Resina}		P_o Total		
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	
Plantas de cobertura (PC)	0,41 ^{ns}	14,82	0,79 ^{ns}	45,13	1,47 ^{ns}	13,95	
Doses de N (N)	0,38 ^{ns}	13,62	1,59 ^{ns}	59,89	10,74 ^{**}	15,29	
PC x N	0,60 ^{ns}		0,59 ^{ns}		1,47 ^{ns}		

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. * *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade.

Nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm houve diminuição no P_o Total em 37 mg kg⁻¹ (~17%), 29 mg kg⁻¹ (~15%) e 25 mg kg⁻¹ (~13%), respectivamente, nos tratamentos com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N (Tabelas 1 a 3). A adubação nitrogenada também causou efeito no P disponível (P_{Resina}), mas apenas na camada de 0-5 cm, reduzindo-o em 12 mg kg⁻¹ (~24%) em relação aos tratamentos sem adubação (Tabelas 1 a 3). A aplicação de N pode acelerar a decomposição da MO e, conseqüentemente, a mineralização do Po (LEE et al., 2004). Como houve diminuição do Po total sem aumento no P disponível em função da aplicação de N, pode-se admitir que houve mineralização do Po nas parcelas com adubação nitrogenada e o P resultante deste processo foi adsorvido pelos colóides do solo, sendo convertido em formas de Pi de menor labilidade. Ao avaliar o efeito de adubação, mineral ou orgânica, na dinâmica de P, com alguma frequência observa-se balanço positivo entre entradas e saídas de P, ou acúmulo no solo,

principalmente nas formas inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis (GATIBONI, 2003; KUO et al., 2005; PAVINATO et al., 2009).

Tabela 4. Teores de fósforo total, disponível (P_{Resina}) e orgânico em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 20 a 40 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P_{Total} mg kg ⁻¹ -----						
0	608,75	563,75	579,75	623,75	590,75	582,25	591,50
120	589,50	627,00	561,50	625,75	581,25	600,75	597,62
Média	599,12	595,37	570,62	624,75	586,00	591,50	
	----- P_{Resina} mg kg ⁻¹ -----						
0	23,25	14,50	27,00	35,00	18,25	19,75	22,95
120	16,00	13,75	19,50	15,50	13,75	19,50	16,33
Média	19,62	14,12	23,25	25,25	16,00	19,62	
	----- $P_{o Total}$ mg kg ⁻¹ -----						
0	172,25	224,75	165,00	160,75	185,25	197,50	184,28
120	185,00	180,50	155,25	165,75	175,75	170,25	172,08
Média	178,62	202,62	160,12	163,25	180,50	183,87	
	P_{Resina}		P_{Total}		$P_{o Total}$		
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	
Plantas de cobertura (PC)	0,84 ^{ns}	66,01	1,18 ^{ns}	7,80	1,36 ^{ns}	20,93	
Doses de N (N)	2,96 ^{ns}	67,93	0,21 ^{ns}	7,84	0,83 ^{ns}	25,93	
PC x N	0,55 ^{ns}		0,90 ^{ns}		0,41 ^{ns}		

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey.. ²ns: não-significativo.* *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade

O efeito da adubação nitrogenada no $P_{o Total}$ nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (Tabelas 1 a 3) pode ser associado à maior atividade microbiana nas camadas superficiais do solo, característico do SPD, que resulta em maior taxa de decomposição dos resíduos vegetais deixados sobre o solo (TIECHER et al., 2012b), bem como pela aplicação de N em superfície (LEE et al., 2004).

O teor de $P_{o Total}$ na camada de 0-5 cm variou de 173,75 a 226,25 mg kg⁻¹ (Tabelas 1 a 4), valores que são semelhantes aos relatados para Latossolos (GUERRA et al., 1996; CUNHA et al., 2007; ZAIA et al., 2008), e representou cerca de 21 a 40% do P_{Total} . Partelli et al. (2009) obtiveram participação do $P_{o Total}$ no P_{Total} de 29 a 56,9%, em lavouras orgânicas de café conilon, proporção que está acima da

obtida com o cultivo das plantas de cobertura. Segundo os autores, essa participação é expressiva e pode ser indicativa de mudança no ciclo de P em função de práticas adotadas no manejo orgânico, como o menor revolvimento do solo e plantas de cobertura, manutenção de resíduos vegetais sobre o solo e adição de materiais orgânicos, favorecendo a manutenção e o acúmulo do P orgânico.

Não houve correlação significativa entre $P_{o\ Total}$ e o teor de MO (0,07). De modo semelhante, Blake et al. (2003) verificaram que os teores de C orgânico de solos de textura arenosa e média não tiveram influência no teor de Po. Isso indica que outros fatores, além do teor de MO, podem influenciar o Po (GUERRA et al., 1996; BLAKE et al., 2003; DARILEK et al., 2010). Segundo Tiecher et al. (2012b), em solos adubados com P, como é o caso do presente experimento, a dinâmica do Po é menos influenciada pela dinâmica do carbono orgânico total do que em sistemas naturais e não fertilizados.

O P_{Resina} correlacionou com o P_{Total} , tanto nos tratamentos com quanto nos tratamentos sem adubação nitrogenada (0,78** e 0,86**, respectivamente), mostrando que os teores presentes na solução estão em equilíbrio com o estoque de P da fase sólida (GATIBONI, 2003). O P_{Resina} correlacionou com o $P_{o\ Total}$ apenas na ausência da adubação nitrogenada (0,78**). A resina extrai as formas lábeis de Pi que são originadas, em parte, da mineralização do Po, sendo que este pode ser a principal fonte de P às plantas, dependendo do manejo do solo (NOVAIS et al., 2007; TURNER; ENGELBRECHT, 2011). A adoção de SPD proporciona acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo e formação de estoque de P microbiano (LOPES et al., 2004), responsável pela mineralização e liberação gradual e parcial de Po (RHEINHEIMER, 2000), o que evita a adsorção rápida do Pi aos colóides minerais (MARTINAZZO et al., 2007). No entanto, a mineralização do Po irá depender da atividade microbiana do solo, a qual é acelerada pela adubação nitrogenada. Assim, a conversão mais rápida dos compostos orgânicos lábeis e do P armazenado na biomassa microbiana a Pi (TAKEDA et al., 2009), quando da utilização de adubação nitrogenada, pode ter favorecido a ocorrência da mesma rota de adsorção do P dos adubos fosfatados, sendo o Pi retido com forte energia de ligação nesse sistema (TIECHER et al., 2012a), não correlacionando, portanto, com o P disponível nessa situação.

4.2 Formas de P no solo

Para interpretação dos resultados obtidos no fracionamento, as formas de P foram classificadas em lábeis ($P_{i\text{ RTA}}$ e $P_{o\text{ H}_2\text{O}}$, P_i e $P_{o\text{ bic}}$), moderadamente lábeis (P_i e $P_{o\text{ NaOH I e II}}$) e não lábeis ($P_{i\text{ HCl}}$ e P_{Residual}), conforme sugerido por Cross e Schlesinger (1995).

4.2.1 Fósforo lábil

Os teores de P_i obtidos pela RTA em lâmina (Tabelas 5 a 8), extrator proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), foram menores do que os obtidos com a resina em esferas (Tabelas 1 a 4), extrator empregado no Estado de São Paulo como medida do P disponível (RAIJ et al., 2001). Apesar da diferença na capacidade de extração houve correlação entre os resultados obtidos com os dois métodos (0,96**), o que indica que as resinas extraem dos mesmos reservatórios, uma com mais intensidade que a outra, mas ambas podem representar o P disponível eficientemente. Resultados semelhantes foram relatados por Merlin (2008), que determinou valores de 10 a 22 mg dm⁻³ com RTA em lâmina e de 38 a 47 mg dm⁻³ com a RTA em esferas, no mesmo conjunto de amostras. A diferença entre os extratores pode ser explicada pelo contato entre partículas de solo e resina, que é maior quando se emprega resina em esferas.

As plantas de cobertura não causaram efeito nos teores de $P_{i\text{ RTA}}$ e $P_{o\text{ H}_2\text{O}}$, e P_i e $P_{o\text{ bic}}$ do solo, nas profundidades avaliadas (Tabelas 5 a 8). Rheinheimer e Anghinoni (2001) também verificaram que o cultivo de plantas anuais teve pouco efeito na dinâmica das formas de P_i . O P inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions e pelo bicarbonato de sódio, e o P orgânico extraído pelo bicarbonato de sódio são as primeiras formas de P obtidas no fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Essas formas contribuem ativamente no suprimento do nutriente para as plantas, e por isso, são consideradas as formas lábeis de P no solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995; GATIBONI et al., 2007; GONÇALVES; MEURER, 2009; TOKURA et al., 2011). Deste modo, o cultivo das plantas de cobertura não alterou as formas lábeis de P, mesmo após 12 anos de adoção deste sistema de manejo.

Tabela 5. Teores de fósforo extraídos pelos extratores resina trocadora de ânions e NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 0 a 5 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha^{-1}	----- $\text{P}_{\text{i RTA}} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	13,75	14,25	20,75	18,75	17,25	15,00	16,63
120	16,25	13,50	14,00	18,25	21,25	19,00	17,04
Média	15,00	13,87	17,38	18,50	19,25	17,00	
	----- $\text{P}_{\text{o H}_2\text{O}} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	2,50	2,25	2,25	1,75	2,50	2,50	2,29 a
120	1,00	1,25	1,00	0,75	0,75	1,25	1,00 b
Média	1,75	1,75	1,62	1,25	1,62	1,87	
	----- $\text{P}_{\text{i bic}} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	8,00	9,00	13,75	11,50	10,75	10,75	10,62
120	13,25	11,50	10,75	14,00	15,00	14,75	13,20
Média	10,62	10,25	12,25	12,75	12,87	12,75	
	----- $\text{P}_{\text{o bic}} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	12,25	10,75	7,50	9,25	8,50	8,25	9,42 a
120	11,25	13,25	8,75	10,75	11,75	11,50	11,20 b
Média	11,75	12,00	8,12	10,00	10,12	9,87	
	$\text{P}_{\text{i RTA}}$		$\text{P}_{\text{o H}_2\text{O}}$		$\text{P}_{\text{i bic}}$		$\text{P}_{\text{o bic}}$
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,89 ^{ns}	36,64	0,65 ^{ns}	45,90	0,58 ^{ns}	36,46	2,36 ^{ns}
N	0,07 ^{ns}	32,80	31,00 ^{**}	48,82	4,28 ^{ns}	36,29	5,68 [*]
PC x N	1,10 ^{ns}		0,26 ^{ns}		0,92 ^{ns}		0,76 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. ^{*}: significativo a 1 % de probabilidade ^{*}: significativo a 5 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.

Tabela 6. Teores de fósforo extraídos pelos extratores resina trocadora de ânions e NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 5 a 10 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P _{i RTA} mg kg ⁻¹ -----						
0	17,00	18,00	21,75	15,50	15,50	16,75	17,41
120	19,75	13,50	16,00	24,00	23,50	18,25	19,16
Média	18,37	15,75	18,87	19,75	19,50	17,50	
	----- P _{o H2O} mg kg ⁻¹ -----						
0	2,25	2,25	2,25	2,00	2,50	1,75	2,16 a
120	1,00	1,00	1,25	0,75	1,00	0,50	0,91 b
Média	1,62	1,62	1,75	1,37	1,75	1,12	
	----- P _{i bic} mg kg ⁻¹ -----						
0	14,25	17,25	20,50	13,00	13,75	16,25	15,83
120	23,00	14,75	16,75	22,75	24,75	20,00	20,33
Média	18,62	16,00	18,62	17,87	19,25	18,12	
	----- P _{o bic} mg kg ⁻¹ -----						
0	11,00	9,00	7,75	7,00	7,50	7,00	8,20 a
120	10,75	9,75	10,00	11,75	11,50	9,00	10,45 b
Média	10,87	9,37	8,87	9,37	9,50	8,00	
	P _{i RTA}		P _{o H2O}		P _{i bic}		P _{o bic}
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,35 ^{ns}	38,94	1,26 ^{ns}	40,16	0,17 ^{ns}	43,15	2,45 ^{ns}
N	0,43 ^{ns}	50,55	37,50 ^{**}	45,86	2,0 ^{ns}	60,95	13,75 ^{**}
PC x N	0,85 ^{ns}		0,10 ^{ns}		0,68 ^{ns}		1,62 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. ^{*}: significativo a 1 % de probabilidade ^{*}: significativo a 5 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.

A aplicação de N não causou efeito nos teores de P inorgânico (P_{i RTA} e P_{i bic}) nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, porém, na camada de 20-40 cm, resultou em aumento significativo de 1,58 (~24,8%) e 1,75 mg kg⁻¹ (~23,5%) no P_{i RTA} e no P_{i bic}, respectivamente (Tabela 8). Embora a mobilidade de Pi na solução do solo seja muito baixa, a mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos deixados em superfície no SPD, condição existente na área por 12 anos, proporcionam liberação e redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos susceptíveis à adsorção que as formas inorgânicas (ANGHINONI, 2007), o que pode

explicar o efeito observado no teor de $P_{i\text{ RTA}}$ e $P_{i\text{ bic}}$ na camada de 20-40 cm. A redistribuição de P_i no perfil de solo em SPD tem sido observada em muitos trabalhos e sua ocorrência é atribuída à liberação de ácidos orgânicos, complexação do Al^{3+} trocável e decomposição das raízes no solo, em profundidade (CORRÊA et al., 2004; PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

Tabela 7. Teores de fósforo extraídos pelos extratores resina trocadora de ânions e $NaHCO_3$ 0,5 mol L^{-1} em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 10 a 20 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha^{-1}	----- $P_{i\text{ RTA}}$ mg kg^{-1} -----						
0	14,00	12,50	16,50	14,75	10,25	12,00	13,33
120	12,75	11,25	12,50	16,75	15,75	19,00	14,66
Média	13,37	11,87	14,50	15,75	13,00	15,50	
	----- $P_{o\text{ H}_2O}$ mg kg^{-1} -----						
0	1,75	2,25	1,75	1,50	1,00	1,75	1,66 a
120	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00	0,75	0,70 b
Média	1,37	1,37	1,12	1,00	1,00	1,25	
	----- $P_{i\text{ bic}}$ mg kg^{-1} -----						
0	13,25	11,75	16,25	15,00	11,25	12,00	13,25
120	15,50	12,00	15,25	13,75	18,75	16,00	15,20
Média	14,37	11,87	15,75	14,37	15,00	14,00	
	----- $P_{o\text{ bic}}$ mg kg^{-1} -----						
0	10,00	8,50	9,25	7,75	9,25	8,50	8,88 a
120	11,25	9,50	10,00	10,75	12,50	9,25	10,54 b
Média	10,62	9,00	9,62	9,25	10,87	8,87	
	$P_{i\text{ RTA}}$		$P_{o\text{ H}_2O}$		$P_{i\text{ bic}}$		$P_{o\text{ bic}}$
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,47 ^{ns}	44,48	0,31 ^{ns}	73,93	0,44 ^{ns}	39,27	0,93 ^{ns}
N	0,37 ^{ns}	54,14	14,04 ^{**}	74,59	1,30 ^{ns}	41,82	5,33 [*]
PC x N	0,64 ^{ns}		0,85 ^{ns}		0,64 ^{ns}		0,42 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. ^{*}: significativo a 1 % de probabilidade ^{*}: significativo a 5 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.

Tabela 8. Teores de fósforo extraídos pelos extratores resina trocadora de ânions e NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 20 a 40 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média	
kg ha ⁻¹	----- P _{i RTA} mg kg ⁻¹ -----							
0	4,50	3,75	5,00	5,75	4,50	5,25	4,79 a	
120	5,50	5,75	5,50	6,25	7,50	7,75	6,37 b	
Média	5,00	4,75	5,25	6,00	6,00	6,50		
----- P _{o H₂O} mg kg ⁻¹ -----								
0	1,50	1,50	1,25	1,25	1,50	1,00	1,33 a	
120	0,50	0,25	0,50	0,00	1,00	0,25	0,41 b	
Média	1,00	0,87	0,87	0,62	1,25	0,62		
----- P _{i bic} mg kg ⁻¹ -----								
0	6,25	5,25	5,50	6,50	5,50	5,25	5,70 a	
120	8,00	7,00	7,50	7,50	8,00	6,75	7,45 b	
Média	7,12	6,12	6,50	7,00	6,75	6,00		
----- P _{o bic} mg kg ⁻¹ -----								
0	13,50	8,00	7,25	8,50	6,00	5,75	8,16	
120	8,75	8,50	8,50	8,50	10,00	7,00	8,54	
Média	11,12	8,25	7,87	8,50	8,00	6,37		
	P _{i RTA}		P _{o H₂O}		P _{i bic}		P _{o bic}	
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)
PC ³	0,37 ^{ns}	56,54	0,62 ^{ns}	97,49	0,55 ^{ns}	26,62	2,48 ^{ns}	33,27
N	5,28 ^{**}	42,73	20,17 ^{**}	80,81	9,91 ^{**}	29,25	0,18 ^{ns}	36,41
PC x N	0,40 ^{ns}		0,37 ^{ns}		0,13 ^{ns}		1,78 ^{ns}	

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey.. ²ns: não-significativo.* *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade.³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.

Nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, houve diminuição do P_{o H₂O} de 1,29 (~56,3%), 1,25 (~57,8%), 0,96 (~57,8%) e 0,92 mg kg⁻¹ (~69,2%), respectivamente (Tabelas 5 a 8), devido à adubação nitrogenada. No P_{o bic} o efeito da adubação nitrogenada foi inverso: aumento de 1,78 (~15,9%), 2,25 (~21,5%) e 1,66 (~15,7%) mg kg⁻¹ nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente (Tabelas 5 a 7). O aumento nos teores de P_{o bic} pode decorrer da migração de outras formas de P. O estímulo à atividade microbiana do solo, causado pela adubação

nitrogenada, pode ter provocado a transformação de formas mais estáveis de P_o em formas orgânicas lábeis (GATIBONI et al., 2007).

O $P_{o\ H_2O}$ e o $P_{o\ bic}$ são correspondentes ao P_o lábil, fração mais instável do P_o e acessível aos microrganismos (BOWMAN; COLE, 1978), que pode se tornar disponível para as plantas com maior facilidade (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982). Por ser facilmente mineralizada, a fração P_o lábil é armazenada em pequenas quantidades no solo (ROSSI, 2013). A variação média observada nas formas $P_{i\ RTA}$ e $P_{o\ H_2O}$ em função da adubação nitrogenada foi de $+1,27\ mg\ kg^{-1}$ e $-1,11\ mg\ kg^{-1}$, respectivamente. Isso sugere que houve mineralização do P_o e transferência para o $P_{i\ RTA}$. Apesar de os valores absolutos de aumento e diminuição terem sido muito semelhantes em todas as camadas, o aumento percentual no P_i foi de 2%, 10%, 9% e 33%, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, com efeito significativo no P_i apenas na camada de 20-40 cm, devido aos menores teores de P.

A alta labilidade da fração bicarbonato é relatada pela maioria dos autores que trabalham com fracionamento de P, indicando que o teor de P extraído pela RTA, sozinho, não representa o P-disponível do solo (GATIBONI, 2003; BLAKE et al., 2003; REDEL et al., 2007; GONÇALVES; MEURER, 2009; PAVINATO et al., 2009). Devido à grande importância na disponibilidade para as plantas das formas de P extraídas por bicarbonato, muitos autores sugerem que estas formas sejam incluídas como índice de disponibilidade de P em sistemas com baixa disponibilidade e adição de P (SHARPLEY et al., 1987; GUERRA et al., 1996; GATIBONI et al., 2007).

4.2.2 Fósforo moderadamente lábil

De modo geral, a soma das formas de $P_{o\ NaOH}$, (Tabelas 9 a 12) foram as que apresentaram maior participação no $P_{o\ Total}$ (Tabelas 1 a 4), comportamento semelhante ao que foi observado com as formas inorgânicas, em que os teores de $P_{i\ NaOH}$ (Tabelas 9 a 12) foram os maiores entre as formas de P_i (Tabelas 1 a 16). Maiores teores de P_i e P_o no compartimento moderadamente lábil também foram observados para diferentes classes de solos em outros estudos (TOKURA et al.,

2002; GONÇALVES; MEURER 2009; SOUZA et al., 2007; SANTOS et al., 2008), nos quais a predominância da fração P_{NaOH} foi atribuída ao fato de elas representarem as formas de P, orgânicas e inorgânicas, ligadas ao solo com alta energia. O $P_{i NaOH}$ está associado aos coloides, principalmente aos óxidos e caulinita, por ligações do tipo monodentado e bidentado. O $P_{o NaOH}$ pode estar nas formas de monoésteres, diésteres, fosfonatos e polifosfatos (TATE; NEWMAN, 1982). Os fosfatos monoésteres perfazem a maior parte do Po em solos tropicais (GATIBONI et al., 2005) e são caracterizados pela alta interação com os coloides do solo e, portanto, baixa acessibilidade ao ataque microbiano (GATIBONI, 2003). Embora as frações P_{NaOH} sejam consideradas de baixa disponibilidade para as plantas, em solos de regiões tropicais elas são relativamente dinâmicas (TIESSEN et al., 1992) e podem contribuir, após transformações, para a absorção vegetal. Assim, ter a maior parte do P total do solo nestas frações não é, necessariamente, um aspecto negativo.

O acúmulo de Po nas formas de P de menor labilidade, como foi obtido no presente trabalho (Tabelas 9 a 12), contribui no tamponamento do P absorvido pelas plantas quando o balanço entre as entradas e saídas de P no sistema for negativo (GATIBONI et al., 2013). Gonçalves e Meurer (2009) observaram coeficientes de correlação de 0,73* entre o P acumulado nas plantas de arroz e as formas de P extraídas por NaOH 0,1 mol L⁻¹. Friessen et al. (1997) verificaram que o P disponível, em solo altamente intemperizado e sob pastagem natural, foi tamponado pelo $P_{o NaOH I}$. De forma semelhante, Sharpley e Smith (1985) verificaram que, com o cultivo, as formas de Po mais resistentes diminuíram. Beck e Sanches (1994), estudando a dinâmica das formas de P do solo após 18 anos de cultivo com e sem adubação fosfatada, verificaram que com a fertilização, todas as formas, exceto o $P_{Residual}$ e o $P_{o NaOH II}$ atuaram como dreno do P aplicado e, onde não houve fertilização, as formas $P_{o bic}$, $P_{i NaOH I}$ e $P_{o NaOH I}$ foram fontes, tamponando o P extraído por RTA.

Tabela 9. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 0 a 5 cm.

N	Crotalária	Lablab	Mucuna	Feijão de Porco	Milheto	Vegetação espontânea	Média
kg ha ⁻¹	----- P _i NaOH I ⁴ mg kg ⁻¹ -----						
0	89,75	79,00	78,50	92,50	91,75	99,75	88,54
120	91,75	79,50	90,75	90,25	86,50	81,25	86,66
Média	90,75	79,25	84,62	91,37	89,12	90,50	
	----- P _o NaOH I mg kg ⁻¹ -----						
0	93,75	81,00	81,00	76,75	69,00	45,25	74,46
120	81,00	70,00	64,00	66,75	63,00	59,00	67,29
Média	87,37a	75,50ab	72,50ab	71,75abc	66,00bc	52,12c	
	----- P _i NaOH II ⁵ mg kg ⁻¹ -----						
0	97,25	90,25	94,25	93,25	97,25	108,75	96,83a
120	103,75	98,00	96,25	107,25	96,75	108,75	101,79b
Média	100,50	94,12	95,25	100,25	97,00	108,75	
	----- P _o NaOH II mg kg ⁻¹ -----						
0	31,25	39,00	43,00	42,50	41,50	24,50	36,95
120	36,00	47,25	39,75	51,50	48,00	40,25	43,79
Média	33,62	43,12	41,37	47,00	44,75	32,37	
	P _i NaOH I		P _o NaOH I		P _i NaOH II		P _o NaOH II
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,65 ^{ns}	19,00	7,28**	17,15	0,66 ^{ns}	18,59	0,58 ^{ns}
N	0,19 ^{ns}	17,16	0,17 ^{ns}	32,34	4,75*	7,93	2,79 ^{ns}
PC x N	0,90 ^{ns}		0,45 ^{ns}		1,00 ^{ns}		0,38 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. * *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio. ⁴ NaOH 0,1 mol L⁻¹. ⁵ NaOH 0,5 mol L⁻¹.

Tabela 10. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 5 a 10 cm.

N	Crotalária	Lablab	Mucuna	Feijão de Porco	Milheto	Vegetação espontânea	Média
kg ha ⁻¹	----- P _i NaOH I ⁴ mg kg ⁻¹ -----						
0	108,25	114,00	102,25	113,50	102,25	121,00	110,70
120	108,00	97,50	121,25	110,00	123,25	111,00	111,83
Média	108,12	105,75	113,25	111,75	112,75	116,00	
	----- P _o NaOH I mg kg ⁻¹ -----						
0	67,25	50,00	43,50	56,50	66,75	56,75	56,79
120	53,25	49,00	51,00	46,25	61,00	66,75	54,54
Média	60,25	49,50	47,25	51,37	63,87	61,75	
	----- P _i NaOH II ⁵ mg kg ⁻¹ -----						
0	90,75	95,25	100,00	98,50	90,25	104,75	96,58 a
120	106,50	98,25	107,25	115,50	112,50	123,50	110,58 b
Média	98,62	96,75	103,62	107,00	101,37	114,12	
	----- P _o NaOH II mg kg ⁻¹ -----						
0	33,25	33,75	30,50	34,25	51,00	24,50	34,54
120	41,75	46,25	21,00	29,50	32,50	29,00	33,33
Média	37,50	40,00	25,75	31,87	41,75	26,75	
	P _i NaOH I		P _o NaOH I		P _i NaOH II		P _o NaOH II
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,25 ^{ns}	18,76	2,12	24,77	0,83 ^{ns}	18,90	1,29 ^{ns}
N	0,01 ^{ns}	31,47	0,16 ^{ns}	34,98	16,24 ^{**}	11,61	0,06 ^{ns}
PC x N	0,35 ^{ns}		0,49 ^{ns}		0,74 ^{ns}		1,02 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. * *: significativo a 1 % de probabilidade *: significativo a 5 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; N:doses de nitrogênio. ⁴ NaOH 0,1 mol L⁻¹. ⁵ NaOH 0,5 mol L⁻¹.

Tabela 11. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 10 a 20 cm.

N	Crotalaria	Lablab	Mucuna	Feijão de Porco	Milheto	Vegetação espontânea	Média	
kg ha ⁻¹	----- P _i NaOH I ⁴ mg kg ⁻¹ -----							
0	100,00	99,25	101,75	102,50	110,00	119,25	105,45	
120	98,25	92,25	102,50	96,25	101,25	92,00	97,08	
Média	99,12	95,75	102,12	99,37	105,62	105,62		
----- P _o NaOH I mg kg ⁻¹ -----								
0	85,50	54,50	47,75	74,25	62,25	36,00	60,04	
120	61,25	46,00	35,50	42,25	53,25	50,00	48,04	
Média	73,37	50,25	41,62	58,25	57,75	43,00		
----- P _i NaOH II ⁵ mg kg ⁻¹ -----								
0	90,50	91,50	99,50	92,25	92,25	109,25	95,87 a	
120	94,50	99,00	96,75	112,00	106,50	117,00	104,29 b	
Média	92,50	95,25	98,12	102,12	99,37	113,12		
----- P _o NaOH II mg kg ⁻¹ -----								
0	39,00	21,25	35,25	35,50	61,75	33,25	37,66	
120	24,50	30,25	20,25	31,75	37,00	27,75	28,58	
Média	31,75	25,75	27,75	33,62	49,37	30,50		
	P _i NaOH I		P _o NaOH I		P _i NaOH II		P _o NaOH II	
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)
PC ³	0,36 ^{ns}	18,39	0,97 ^{ns}	62,69	0,74 ^{ns}	23,69	1,06 ^{ns}	69,90
N	0,96 ^{ns}	29,24	1,51 ^{ns}	62,66	4,87*	13,20	1,97 ^{ns}	67,63
PC x N	0,22 ^{ns}		0,44 ^{ns}		0,71 ^{ns}		0,54 ^{ns}	

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.. ²ns: não-significativo. *: significativo a 5 % de probabilidade.³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.⁴ NaOH 0,1 mol L⁻¹. ⁵ NaOH 0,5 mol L⁻¹.

Tabela 12. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e NaOH 0,5 mol L⁻¹ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 20 a 40 cm.

N	Crotalária	Lablab	Mucuna	Feijão de Porco	Milheto	Vegetação espontânea	Média
kg ha ⁻¹	----- P _i NaOH I ⁴ mg kg ⁻¹ -----						
0	59,50	60,75	62,00	62,75	69,75	63,75	63,08
120	63,25	66,50	69,00	57,00	60,50	66,50	63,79
Média	61,37	63,62	65,50	59,87	65,12	65,12	
	----- P _o NaOH I mg kg ⁻¹ -----						
0	79,50	51,75	46,25	54,25	58,00	45,50	55,87
120	48,75	50,75	31,00	52,00	49,00	36,50	44,66
Média	64,12	51,25	38,62	53,12	53,50	41,00	
	----- P _i NaOH II ⁵ mg kg ⁻¹ -----						
0	80,25	81,00	87,25	82,75	87,00	96,75	85,83 a
120	92,50	93,75	90,25	97,25	90,00	99,50	93,87 b
Média	86,37	87,37	88,75	90,00	88,50	98,12	
	----- P _o NaOH II mg kg ⁻¹ -----						
0	38,75	14,25	22,50	34,50	51,25	28,50	31,62
120	27,75	44,75	25,50	29,00	29,00	29,00	30,83
Média	33,25	29,50	24,00	31,75	40,12	28,75	
	P _i NaOH I		P _o NaOH I		P _i NaOH II		P _o NaOH II
	Teste F ²	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)	Teste F
PC ³	0,33 ^{ns}	17,88	1,16 ^{ns}	48,62	0,52 ^{ns}	18,42	0,64 ^{ns}
N	0,04 ^{ns}	20,23	3,32 ^{ns}	42,36	8,00*	10,95	0,03 ^{ns}
PC x N	0,53 ^{ns}		0,52 ^{ns}		0,66 ^{ns}		2,44 ^{ns}

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.. ²ns: não-significativo. *: significativo a 5 % de probabilidade.³PC: planta de cobertura; N: doses de nitrogênio.⁴ NaOH 0,1 mol L⁻¹. ⁵ NaOH 0,5 mol L⁻¹.

Nos primeiros 5 cm de profundidade, o cultivo de crotalária resultou em maiores teores de P_o NaOH I em relação ao milho e à vegetação espontânea (Tabela 9). Em relação à vegetação espontânea, as plantas de crotalária, lablab e mucuna resultaram em aumento de 35, 23 e 20 mg kg⁻¹ de P_o NaOH I ou 40, 31 e 28%, respectivamente. Nas demais camadas não foram verificados efeitos das plantas de cobertura (Tabelas 10 a 12) e, de fato, quando o solo é cultivado por longo período de tempo em SPD, ocorre acúmulo de P na camada superficial do solo (REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008) devido à sucessivas deposições de resíduos

culturais na superfície do solo e ao revolvimento do solo apenas no sulco de semeadura (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

O aumento na fração $P_{o\ NaOH}$ I obtido com cultivo de crotalária em relação ao milho e à vegetação espontânea (Tabela 9) pode estar relacionado com a qualidade química do resíduo, principalmente com os teores de lignina e polifenóis e relações C/N e C/P, que definem a susceptibilidade à decomposição do resíduo e a liberação de nutrientes (MATOS et al., 2011). Características como elevada produção de biomassa (TEODORO et al., 2011; PERIN et al., 2010), maior teor de P_i solúvel no tecido (MARSOLA, 2008; GIACOMINI et al., 2003), associação com fungos micorrízicos (REDEL et al., 2007; BENEDETTI et al., 2005) e baixa relação C/N em relação às gramíneas (PERIN et al., 2010; SILVA; DELATORRE, 2009) são apresentadas em muitos trabalhos como justificativas para maior mobilização e ciclagem de P pelas leguminosas. Marsola (2008), avaliando as formas de P no solo após incorporação e incubação de aveia-preta, nabo forrageiro, crotalária e milho, verificou aumento significativo de P_i e $P_{o\ NaOH}$ nos solos com nabo forrageiro em comparação às outras plantas e ao solo sem adubação verde.

O aumento observado na forma de $P_{o\ NaOH}$ I causado pelas plantas de cobertura (Tabela 9) é muito importante na dinâmica do P (SOUZA et al., 2007), pois, por meio de processos de mineralização/imobilização, o P orgânico pode se comportar como um reservatório (fator quantidade), tamponando as formas mais lábeis de P (TIESSEN et al., 1984; NOVAIS et al., 2007). Tokura et al. (2011), avaliando a influência da aplicação de silício e fósforo nas formas de P em Neossolo Quartzarênico Órtico e Latossolo Vermelho Distrófico, antes e após cultivo de arroz, verificaram que, entre as formas orgânicas, apenas o $P_{o\ NaOH}$ I contribuiu para nutrição das plantas de arroz no Latossolo. Tiecher et al. (2012a), avaliando a dinâmica de P em SPD e SCC com cultivo de espécies de inverno em sequência à cultura de soja verificaram que a maior parte do fosfato aplicado via fertilizantes foi convertida à formas orgânicas, em vez de ser adsorvido pela fração mineral do solo. O aumento ocorreu nas formas orgânicas moderadamente lábeis, extraídas pelo NaOH, e nas formas não lábeis ($P_{Residual}$). Os autores inferiram que o maior teor de P_o na camada superficial pode ter origem da deposição de resíduos orgânicos e maior atividade da biomassa microbiana que é responsável pela produção de

compostos orgânicos fosfatados a partir do P_i . Redel et al. (2007) também verificaram aumento no teor de P_o moderadamente lábil extraído pelo NaOH com o tempo de cultivo (155% em 4 anos), e atribuíram esse resultado à formação de grande quantidade de complexos de P com substâncias húmicas, processo que foi considerado o principal dreno do fosfato aplicado via fertilizante.

O aumento do P_o com o cultivo das plantas de cobertura (Tabela 9) também pode estar associado com a aplicação de fertilizante em sulco, sem revolvimento de solo, e o aumento de ácidos orgânicos oriundos da decomposição das plantas de cobertura, que levam a inibição da adsorção de P pelo solo. A aplicação do adubo no sulco de semeadura causa diminuição do contato entre o P_i do fertilizante e o solo, e o aumento dos ácidos orgânicos leva ao bloqueio dos sítios de adsorção por recobrimento dos óxidos de Fe e Al pelos ácidos (REDEL et al., 2007; ZAMUNER et al., 2008). Possivelmente, esses fatores permitem que o P_i do fertilizante seja transformado pela biomassa e se acumule na fração orgânica de P, extraída com NaOH. Essa conversão de P_i à forma orgânica de NaOH é uma ferramenta importante na melhoria da eficiência da adubação fosfatada, particularmente em solo tropicais, altamente fixadores de P.

No fracionamento, o quinto extrator é o NaOH 0,5 mol L⁻¹, responsável por deissorver as formas orgânicas e inorgânicas de fósforo ($P_{NaOH II}$) similares às extraídas pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹ ($P_{NaOH I}$), porém não estimadas por este por estarem fisicamente protegidas no interior de microagregados (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Assim, a solução 0,5 mol L⁻¹ apenas completa a extração iniciada pelo NaOH 0,1 mol L⁻¹ (CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985).

A adubação nitrogenada aumentou as formas de $P_{i NaOH II}$ em todas as camadas de solo amostradas (Tabelas 9 a 12). Os aumentos nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm foram de 4,96, 14,00, 8,42 e 8,04 mg kg⁻¹, respectivamente, que foram acompanhados de diminuições, de modo geral maiores, mas não significativas, de 7,17, 2,25, 12,00 e 11,21 mg kg⁻¹ nas formas de $P_{o NaOH II}$. Apesar da não significância estatística em parte dos dados é possível supor que a adubação com N aumentou a mineralização de $P_{o NaOH I}$ pelos microrganismos do solo e que parte do P_i gerado foi readsorvido, repondo as frações inorgânicas de $P_{i NaOH II}$. Ainda, parte do P mineralizado pode ter sido reimmobilizado e transformado em $P_{o bic}$,

cujo aumento em função da adubação nitrogenada já foi comentado (Tabelas 5 a 8). Gatiboni et al. (2007), verificaram aumento nos teores de $P_{i\ NaOH\ II}$ e diminuição nos teores de $P_{o\ NaOH\ I}$ e $P_{o\ NaOH\ II}$, atribuindo esse resultado a adsorção de P oriundo da mineralização do P_o , nas formas de $P_{i\ NaOH\ I}$ e $P_{i\ NaOH\ II}$. Nesse experimento, os autores observaram que no solo sem adubação, 75% do P absorvido pelas plantas de cobertura foi originado das formas orgânicas de P, enquanto que em solo adubado esse valor foi de 46%. No entanto, os autores alertam que, mesmo que as formas mais recalcitrantes de P tenham contribuído para absorção vegetal, as taxas de dessorção não foram adequadas para suprir as necessidades nutricionais das plantas, e que, assim, não é adequado contar com as formas menos lábeis de P como fonte para culturas comerciais que necessitam de alta disponibilidade de P para serem produtivas.

4.2.3 Fósforo não lábil

Os teores de $P_{i\ HCl}$ (Tabelas 13 a 16) foram maiores que os relatados por outros autores (GATIBONI et al., 2007; MARSOLA, 2008; TOKURA et al., 2011). A solução de HCl 1 mol L⁻¹ ($P_{i\ HCl}$) extrai preferencialmente as formas de P ligadas ao cálcio (CROSS; SCHLESINGER, 1995), que, somadas ao $P_{Residual}$, compõem a fração não lábil de P. A forma $P_{i\ HCl}$ é normalmente derivada de minerais primários apatíticos que, nos solos intemperizados, são de ocorrência pouco comum (SCHMITT, 2012). De modo geral, essa fração tem participação pouco expressiva no solo e na disponibilidade de P para as plantas, embora Rheinheimer e Anghinoni (2001) tenham relatado que em solos sob SPD, no Sul do Brasil, há incremento de formas de $P_{i\ HCl}$ pela adição continuada de adubos fosfatados e calcário na camada superficial do solo.

Na área experimental as condições de pH não eram favoráveis para a precipitação de fosfatos de cálcio, já que a ocorrência de precipitação de P devido ao incremento de Ca^{2+} acontece em situação de neutralidade-alcalinidade do solo (VU; ARMSTRONG, 2008). Desse modo, os teores relativamente altos determinados nesta fração podem estar associados à presença de resíduo de fertilizantes fosfatados não dissolvidos nas amostras coletadas. Esta possibilidade é reforçada pelo valor de CV alto obtido com este conjunto de dados.

O cultivo de espécies leguminosas e gramíneas em cobertura não causou variação significativa nos teores de $P_{i\text{ HCl}}$. Por outro lado, houve aumento de 3 mg kg^{-1} desta forma na profundidade de 20-40 cm devido à adubação nitrogenada (Tabela 16). Pavinato (2007), avaliando extratos de aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), milho, milheto, soja e sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*), no deslocamento e disponibilização de P verificaram que não houve efeito das plantas na fração $P_{i\text{ HCl}}$. Embora a adubação nitrogenada tenha causado aumento na forma $P_{i\text{ HCl}}$ na profundidade de 20-40 cm, ele têm pouca importância na disponibilidade para as plantas, pois, somado ao P_{Residual} , o $P_{i\text{ HCl}}$ compõe a parte mais recalcitrante de P no solo. Gatiboni et al. (2007), avaliando a biodisponibilidade das formas de P acumuladas em solo em plantio direto, verificaram que somente após 15 cultivos sucessivos de plantas de cobertura, sem adubação fosfatada, foi observada pequena depleção de $P_{i\text{ HCl}}$.

Tabela 13. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de $\text{HCl } 1,0\text{ mol L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 0 a 5 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha^{-1}	$P_{i\text{ HCl}}\text{ mg kg}^{-1}$						
0	20,50	12,00	11,50	21,75	25,75	20,75	20,33
120	18,75	15,00	31,00	21,25	22,00	24,75	20,50
Média	19,62	13,50	21,25	21,50	23,87	22,75	
	$P_{\text{Residual}}\text{ H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}\text{ mg kg}^{-1}$						
0	371,25	405,50	389,25	383,00	335,00	372,50	376,08
120	423,00	365,25	330,25	423,50	345,50	376,25	377,29
Média	397,12	385,37	359,75	403,25	340,25	374,37	
		$P_{i\text{ HCl}}$		$P_{\text{Residual}}\text{ H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$			
		Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)		
PC ²		1,20 ^{ns}	46,59	1,52 ^{ns}	14,45		
N ³		0,01 ^{ns}	28,28	0,01 ^{ns}	13,40		
PC x N		0,51 ^{ns}		1,50 ^{ns}			

¹ ns: não-significativo. ² PC: planta de cobertura; ³ N: doses de nitrogênio.

Não houve variação significativa nos teores de P_{Residual} devido ao cultivo de plantas de cobertura e à adubação nitrogenada, em todas as profundidades de solo

avaliadas (Tabelas 13 a 16). O P_{Residual} é uma forma recalcitrante, de difícil acesso pelos extratores químicos seletivos usados nos esquemas de fracionamento, e que pode contribuir para a nutrição das plantas apenas em situações de extrema carência do nutriente no solo (GATIBONI et al., 2005). Tal como o P_{Total} , em solos pouco sujeitos a perdas por lixiviação ou remoção pelas colheitas, o P_{Residual} não sofre alterações significativas. Gatiboni (2003) observou que a fração residual de P sofreu alteração somente após 12 a 15 cultivos sucessivos sem adição de fertilizante, e ressaltou que as formas mais recalcitrantes só tem participação na disponibilidade de P no momento em que a carência das formas mais disponíveis for severa.

Tabela 14. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$ em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 5 a 10 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- $P_{\text{HCl}} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	18,00	10,25	14,75	12,50	23,00	14,00	15,41
120	18,00	11,00	20,75	19,00	19,50	19,50	17,95
Média	18,00	10,62	17,75	15,75	21,25	16,75	
	----- $P_{\text{Residual}} \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF} \text{ mg kg}^{-1}$ -----						
0	356,75	388,25	382,25	363,25	351,25	396,00	372,95
120	371,25	373,25	350,00	342,50	352,75	366,50	359,37
Média	364,00	380,75	366,12	352,87	352,00	381,25	
	P_{HCl}		$P_{\text{Residual}} \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$				
	Teste F		CV (%)		Teste F		
PC ²	0,99 ^{ns1}		59,63		0,93 ^{ns}		
N ³	2,50 ^{ns}		33,39		0,87 ^{ns}		
PC x N	1,06 ^{ns}				0,26 ^{ns}		

¹ ns: não-significativo ² PC: planta de cobertura; ³ N: doses de nitrogênio.

Tabela 15. Teores de fósforo extraídos pelos extratores de HCl 1,0 mol L⁻¹ e H₂SO₄ + H₂O₂ + HF em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 10 a 20 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- P _{i HCl} mg kg ⁻¹ -----						
0	14,75	6,50	12,07	10,50	18,25	13,50	12,58
120	10,75	9,75	16,75	14,50	15,00	18,25	14,16
Média	12,75	8,12	13,37	12,50	16,62	15,87	
	----- P _{Residual} H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ + HF mg kg ⁻¹ -----						
0	358,75	405,25	362,00	359,75	358,75	353,00	366,25
120	379,50	352,00	354,75	355,25	379,75	385,50	367,79
Média	369,12	378,62	358,37	357,50	369,25	369,25	
	P _{i HCl}		P _{Residual} H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ + HF				
	Teste F CV (%)		Teste F CV (%)				
PC ²	1,12 ^{ns1} 60,90		0,37 ^{ns}		10,11		
N ³	0,92 ^{ns} 42,68		0,03 ^{ns}		7,89		
PC x N	1,02 ^{ns}		2,30 ^{ns}				

¹ ns: não-significativo. ² PC: planta de cobertura; ³ N: doses de nitrogênio.

A maior parte do P total das amostras foi determinada na fração residual (Tabelas 13 a 16), o que indica que grande parte do P neste solo encontra-se em formas de alta energia de ligação com os coloides, como observado também por Gatiboni et al. (2007) em Latossolo Vermelho Distroférrico cultivado em SPD.

Tabela 16 - Teores de fósforo extraídos pelos extratores de HCl 1,0 mol L⁻¹ e H₂SO₄ + H₂O₂ + HF em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio na camada de 20 a 40 cm.

N	Mucuna	Lablab	Vegetação espontânea	Milheto	Crotalária	Feijão de Porco	Média
kg ha ⁻¹	----- PiHCl mg kg ⁻¹ -----						
0	7,00	4,75	6,25	7,00	7,50	8,00	6,75 a ¹
120	7,75	8,00	11,25	13,00	9,00	9,75	9,79 b
Média	7,37	6,37	8,75	10,00	8,25	8,87	
	----- P _{Residual} H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ + HF mg kg ⁻¹ -----						
0	395,25	378,75	350,75	392,25	366,75	362,75	374,41
120	372,25	381,50	335,75	359,25	355,75	383,25	364,62
Média	383,75	380,12	343,25	375,75	361,25	373,00	
	P _i HCl		P _{Residual} H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ + HF				
	Teste F	CV (%)	Teste F	CV (%)			
PC ³	0,88 ^{ns2}	45,98	1,52 ^{ns}	9,29			
N ⁴	14,73 ^{**}	33,19	1,01 ^{ns}	9,15			
PC x N	1,16 ^{ns}		0,64 ^{ns}				

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ²ns: não-significativo. ^{**}: significativo a 1 % de probabilidade. ³PC: planta de cobertura; ⁴ N: doses de nitrogênio.

As formas inorgânicas de P obtidas no fracionamento, P_i RTA (0,82^{**}), P_i bic (0,76^{**}), P_i NaOH I (0,85^{**}), P_i HCl (0,74^{**}) e P_i NaOH II (0,84^{**}) apresentaram correlação com o P_{Total}. Esse resultado sugere que as formas inorgânicas de P obtidas no fracionamento e o P_{Total} estão em equilíbrio dinâmico no solo, ou seja, ocorrendo a adição ou retirada de P no solo, haverá a redistribuição de P entre essas formas (GATIBONI et al., 2013).

4.3 Acurácia do fracionamento

A acurácia do fracionamento de P foi avaliada comparando-se o P total determinado pelo método descrito por Kuo (1996) e a soma das formas de P (P_t Σ), nas quais estão incluídas as formas de P_i e P_o (RTA, bic, NaOH I e II), P_i HCl e P_{Residual}. No fracionamento foi recuperado de 88 a 113% do P em relação ao teor de P total do solo, resultando em média, 101% do P_t. A correlação entre ambos foi de 0,9535^{**} (Figura 2). As taxas de recuperação de P obtidas no presente trabalho foram maiores do que as relatadas por Gatiboni et al. (2007) em solo cultivado em SPD.

Os autores obtiveram correlação de 0,89** entre $Pt \Sigma$ e Pt , e média de recuperação no fracionamento de 68,5% do Pt . Para os melhores resultados que foram obtidos no presente trabalho contribuíram a determinação do Po_{H_2O} e a coleta e combinação das soluções de lavagem aos extratos, após extração de cada fração, procedimentos que não foram adotados por Gatiboni et al. (2007).

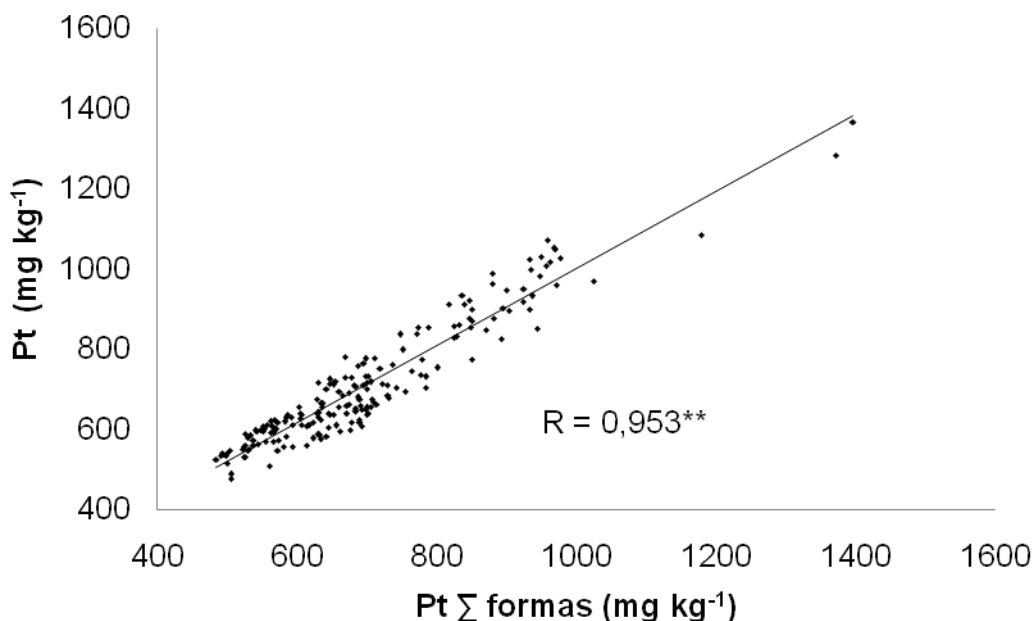


Figura 2. Correlação entre P total determinado por digestão ácida (Pt) e por soma das formas de P do fracionamento ($Pt \Sigma$). **significativo a 1% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

O cultivo de crotalária, lablab, feijão-de-porco, mucuna-cinza e milho como plantas de cobertura em pré-safra de milho aumenta o P orgânico moderadamente lábil ($Po_{NaOH I}$) na camada superficial do solo.

A adubação nitrogenada favorece a mineralização de Po no solo e redistribui as formas de Pi e Po entre os compartimentos lábeis e moderadamente lábeis, sem causar impacto no P disponível.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema de plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J C.L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.

ASSIS, E. P. M.; CORDEIRO, M. A. S.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M. A. C. Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.33, p.107-112, 2003.

BAVEYE, P. C. Looming scarcity of phosphate rock and intensification of soil phosphorus research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p.637-642, 2015.

BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1424-1431, 1994.

BENEDETTI, T.; ANTONIOLLI, Z. I.; GIRACCA, E. N.; STEFFEN, R. B. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares na cultura do milho após uso de espécies de plantas de cobertura de solo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, p.44-51, 2005.

BLAKE, L.; JOHNSTON, A. E.; POULTON, P. R.; GOULDING, K. W. T. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, The Hague, v.254, p.245-261, 2003.

BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F. R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1269-1276, 2007.

BORKERT, C. M.; GAUDÊNCIO, C. A.; PEREIRA, J. E.; PEREIRA, L. R.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.143-153, 2003.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. Transformation of organic phosphorus substrates in soil as evaluated by NaHCO_3 extraction. **Soil Science**, Baltimore, v.125, p.95-101, 1978.

BOWMAN, R. A. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and diluted base for soil organic phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.326-366, 1989.

CARNEIRO, M. A. C.; CORDEIRO, M. A. S.; ASSIS, P. C. R.; MORAES, E. S.; PERREIRA, H. S.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, Campinas, v.67, p.455-462, 2008.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.383-395, 1989.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ^{31}P nuclear magnetic resonance analysis. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, p.199-207, 1985.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.896-900, 2003.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.1231-1237, 2004.

COSTA, C. T.; STRIEDER, L.; ABEL, S.; DELATORRE, C. A. Phosphorus and nitrogen interaction: loss of QC identity in response to P or N limitation is anticipated in pdr 23 mutant. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campo dos Goytacazes, v.23, p.219-229, 2011.

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

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L. L.; LIMA E. V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.161-168, 2005.

CUNHA, G. M.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, G. S.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.667-671, 2007.

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

DARILEK, J. L.; HUANG, B.; LI, D. C.; WANG, Z. G.; ZHAO, Y. C.; SUM, W. X.; SHI, X. Z. Effect of land use conversion from rice paddies to vegetable fields on soil phosphorus fractions. **Pedosphere**, Oxford, v.20, p.137-145, 2010.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132). Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhot_qk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2015.

FIXEN, P. E. World fertilizer nutrient reserves. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Eds.) **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Contexto mundial e práticas de suporte. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p.93-109, 2010.

FRIESSEN, D. K.; RAO, I. M.; THOMAS, R. J.; OBERSON, A.; SANZ, J. L. Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 196, p. 289-294, 1997

GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BRITO, E. C. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1421-1428, 2007.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L. C.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, A. F. C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M. A. S. Phosphorus forms and availability assessed by ^{31}P -NMR in successive cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.36, p.2625-2640, 2005.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.691-699, 2007.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Formas de fósforo no solo após sucessivas adições de dejetos líquidos de suínos em pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1753-1761, 2008.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.8, p.141-187, 2013.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HÜBNER, A. P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E. B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1097-1104, 2003.

GONÇALVES, G. K. **Formas e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. 2007. 186f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

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, v.33, p.357-362, 2009.

GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M. C.; AITKENHEAD-PETERSON, J. A.; GENTRY, T.; ZUBERER, D.; HONS, F.; LOEPPERT, R. Soil microbial community, C, N, and P responses to long-term tillage and crop rotation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.106, p.285-293, 2010.

GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. J.; SANTOS, G. A.; FERNANDES, M. S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, p.291-299, 1996.

GUO, F.; YOST, R. S.; HUE, N. V.; EVENSEN, C. I.; SILVA, J. A. Changes in phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p.1681-1689, 2000.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. An introduction to nutrient management. 7. ed. New Jersey, Pearson Education, 2005. 515p.

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, p.970-976, 1982.

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measurements for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, The Hague, v.237, p.211-223, 2001.

KELLER, M.; OBERSON, A.; KATHRIN E. A.; TAMBURINI, F.; MÄDER, P.; MAYER, J.; FROSSARD, E.; BÜNEMANN, E. K. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Göttingen, v.175, p.385-393, 2012.

KOVAR, J. L.; PIERZYNSKI, G. M. **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. Virginia Tech. University Press, 2009. 122p. (Southern Cooperative Series Bulletin No. 408)

KUO, S.; HUANG, B.; BEMBENEK, R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.4. p.116-123, 2005.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Eds.) **Methods of soil analysis: Chemical methods**. Madison, Soil Science Society of America, p.869-920, 1996.

LAMBERS, H.; RAVEN, J. A.; SHAVER, G. R.; SMITH, S. E. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v.23, p.95-103, 2008.

LEE, C. H.; PARK, C. Y.; PARK, K. D.; JEON, W. T.; KIM, P. J. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. **Chemosphere**, Amsterdam, v.56, p.299-304, 2004.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto**: Bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo, ANDA, 2004. 110p.

MALHI, S. S.; LEMKE, R.; WANG, Z. H.; CHHABRA, B. S. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.90, p.171-183, 2006.

MARIANO, I. O. S.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. C. Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem e níveis críticos de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.26, p.731-740, 2002.

MARSOLA, T. **Mineralização de fósforo do adubo verde e sua absorção por plantas de arroz**. 2008. 144 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

MARTINAZZO, R.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.563-570, 2007.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A.; LEITE, L. F. C.; GALVÃO, J. C. C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.625-632, 2006.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M.; LIMA, P. C.; FREESE, D. Decomposition and nutrient release of leguminous plants in coffee agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p.141-149, 2011.

MERLIN, A. **Disponibilidade de fósforo para a soja cultivada sobre braquiária**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

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

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Göttingen, v.172, p.305-325, 2009.

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

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

PACHECO, L. P.; PIRES, F. R.; MONTEIRO, F. P.; PROCOPIO, S. O.; ASSIS, R. L.; CARMO, M. L.; PETTER, F. A. Desempenho de plantas de cobertura em sobressemeadura na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.815-823, 2008.

PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, p.2065-2072, 2009.

PAVINATO, P. S. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. 2007. 145 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.911-920. 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, p.149-155, 2009.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; CABALLERO, S. S. U.; GUERRA, J. G. M.; GUSMÃO, L. A.. Acúmulo e liberação de P, K, Ca e Mg em crotalária e milho solteiros e consorciados. **Revista Ceres**, Viçosa , v.57, p.274-281, 2010 .

QIAO, S. M. Y. Distribution of inorganic and organic phosphorus fractions in two phosphorus deficient soils as affected by crop species and nitrogen applications. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.43, p.631-644, 2012.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2001. 235p.

REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; ROUANET, J. L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v.139, p.388-396, 2007.

REDDY, D.; SUBBARAO, A.; RUPA, T. R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. **Bioresource Technology**, Nabibagh, v.75, p.113-118, 2000.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.35, p.2339-2354, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.1053-1059, 2003.

RICHARDSON, A.E.; HOCKING, P. J.; SIMPSON, R. J.; GEORGE T. S. Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. **Crop & Pasture Science**, Victoria, v.60, p.124-143, 2009.

ROSSI, C. Q. **Matéria orgânica do solo e fósforo orgânico em Cronosseguência de cana-de-açúcar cultivada no cerrado**. 2013. 89f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTI, A.; AMADO, T. J. C.; ACOSTA, J. A. A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1075-1083, 2003.

SANTOS, H. G. ; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B.. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed.. Brasília, Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, Á.V.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.705-714, 2008.

SANTOS, D. B. M. **Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto**. 2009. 81f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SAUNDERS, W. M. H.; WILLIAMS, E. G. Observations on the determination of total organic phosphorus in soil. The **Journal of Soil Science**, Oxford, v.6, p.254-267, 1955.

SHARPLEY, A. N.; SMITH, S. J. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, p.127-130, 1985.

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.362-365, 1987.

SILVA, T. O.; NETO, A. E. F.; CARNEIRO, V. P. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, p.1315-1326, 2011.

SILVA, A. A.; DELATORRE, C. A. Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.8, p.152-163, 2009.

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P. C. O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.477-486, 2006.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (eds). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T.; TORRES, P. R. F. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1535-1544, 2007.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.4, p.41-60, 1987.

TAKEDA, M.; NAKAMOTO, T.; MIYAZAWA, K.; MURAYAMA, T.; OKADA, H. Phosphorus availability and soil biological activity in an Andosol under compost application and winter cover cropping. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.42, p. 86-95, 2009.

TATE, K.R.; NEWMAN, R.K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zealand tussock grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.14, p.91-196, 1982.

TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, D. M. N.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no Cerrado do Alto Vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.635-643. 2011.

THIEN, S. J.; MYERS, R. Determination of bioavailable phosphorus in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p. 814-818, 1992.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.271-281, 2012a.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.124, p. 57-67, 2012b.

TIESSSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, p.853-858, 1984.

TIESSSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.38, p.139-151, 1992.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L.; ALOVISI, A. A. Dinâmica das formas de fósforo em solos de textura e mineralogia contrastantes cultivados com arroz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, p.171-179, 2011.

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

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de matéria seca por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p.421-428, 2008.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.609-618, 2005.

TURNER, B. L. Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. **Journal of Ecology**, London, v.96, p.698–702, 2008.

TURNER, B. L.; ENGELBRECHT, B. M. J. Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.103, p.297-315, 2011.

VU, D. T.; TANG, C.; ARMSTRONG, R. D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. **Plant and Soil**, The Hague, v.304, p.21-34, 2008.

WANG, J.; LIU, W. Z.; MU, H. F.; DANG, T. H. Inorganic phosphorus fractions and phosphorus availability in a calcareous soil receiving 21-years superphosphate application. **Pedosphere**, Oxford, v.20, p.304-310, 2010.

WANG, X.; TANG, C.; GUPPY, C. N. SALE, P. W. G. Phosphorus acquisition characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and white lupin (*Lupinus albus* L.) under P deficient conditions. **Plant and soil**, The Hague, v.312, p.117-128, 2008.

YANG, K.; ZHU, J.; GU, L. Y.; WANG, Z. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v.71, p.1-8, 2014.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1191-1197, 2008.

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.99, p.131-138, 2008.