

# Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada

Jacqueline Nayara Ferraça Leite<sup>(1)</sup>, Mara Cristina Pessôa da Cruz<sup>(1)</sup>,  
Manoel Evaristo Ferreira<sup>(1)</sup>, Itamar Andrioli<sup>(1)</sup> e Lucas Boscov Braos<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus Jaboticabal, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/nº, CEP 14884-900 Jaboticabal, SP, Brasil. E-mail: jferraca@gmail.com, mcpcruz@fcav.unesp.br, evaristo@fcav.unesp.br, itamar@fcav.unesp.br, lucasbraos@hotmail.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações nas formas orgânicas e inorgânicas de P causadas pelo cultivo de plantas de cobertura e pelo uso de doses de nitrogênio em solo sob sistema plantio direto. O experimento foi delineado em blocos ao acaso, com parcelas subdivididas, em um Latossolo Vermelho distrófico. Os tratamentos principais foram plantas de cobertura: quatro leguminosas, uma gramínea e pousio (vegetação espontânea); os tratamentos secundários foram doses de N em cobertura (0 e 120 kg ha<sup>-1</sup>) na cultura do milho. Amostras de solo foram coletadas 12 anos após o início do experimento, e nelas foram determinadas formas orgânicas e inorgânicas de P. Os extratores usados foram: resina; soluções de NaHCO<sub>3</sub>, NaOH e HCl; e mistura de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HF + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. As formas obtidas foram classificadas em P lábil (P<sub>resina</sub> + P<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>), P moderadamente lábil (P<sub>NaOH</sub>) e P não lábil. O cultivo de crotalária, lablab e mucuna em pré-safra de milho aumenta o P orgânico moderadamente lábil (P<sub>NaOH</sub>) na camada superficial do solo em comparação à área de pousio. A adubação nitrogenada favorece a mineralização de P orgânico no solo e redistribui as formas de P inorgânico e de P orgânico entre os compartimentos lábeis e moderadamente lábeis, sem causar impacto no P disponível.

Termos para indexação: fracionamento de fósforo, gramíneas, leguminosas, nitrogênio, plantio direto.

## Organic and inorganic P forms in soil as affected by cover crops and nitrogen fertilization

Abstract – The objective of this work was to evaluate the effects on organic and inorganic forms of soil phosphorus of the cultivation of cover crops and the use of nitrogen levels in soil under no-tillage system. The experiment was carried out in a randomized complete block design, in split plot, on a Rhodic Hapludox. The main treatments were cover crops: four legumes, one grass, and fallow (spontaneous vegetation); the secondary treatments were N fertilization in top-dressing (0 and 120 kg ha<sup>-1</sup>) applied on corn. Soil samples were collected 12 years after the beginning of the experiment, and organic and inorganic P forms were measured in them. The P forms were extracted with: resin; solutions of NaHCO<sub>3</sub>, NaOH, and HCl; and a mixture of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+HF. The obtained forms were classified as labile P (resin-P + NaHCO<sub>3</sub>-P), moderately labile P (NaOH-P) and non-labile P. The cultivation of sunn hemp, lablab, and velvet bean in corn pre-cropping increases the moderately labile organic P (P<sub>NaOH</sub>) in the topsoil in comparison with the fallow area. Nitrogen fertilization favors organic P mineralization in soil and redistributes forms of inorganic and organic P between the labile and moderately labile compartments, without impacting available P.

Index terms: phosphorus fractionation, grass, legumes, nitrogen, no-tillage.

## Introdução

O fósforo (P) do solo é dividido em inorgânico (Pi) e orgânico (Po), e a participação destas formas na manutenção da disponibilidade de P para as plantas é dependente de vários fatores, entre eles, a adubação fosfatada. Mudanças na distribuição das formas de P do solo podem também ser associadas ao sistema de preparo do solo, à quantidade de P exportada na

colheita, à taxa de reposição do P exportado do sistema e à habilidade das plantas em utilizar as reservas de P das formas menos lábeis (Takahashi & Anwar, 2007; Tiecher et al., 2012).

Sistemas de manejo que promovem aumento de matéria orgânica (MO) no solo, como o sistema plantio direto (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 Al (Zamuner et al., 2008). O cultivo de plantas de cobertura no SPD pode favorecer o acúmulo de MO nos solos e aumentar a eficiência da reciclagem dos nutrientes. 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 dos nutrientes 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).

A adubação nitrogenada também interfere na distribuição das formas e na disponibilidade de P. Ela pode aumentar a produção de biomassa das plantas cultivadas e, com isso, contribuir para o aumento da adição de resíduos orgânicos ao solo e, conseqüentemente, para a ciclagem de P. Há, inclusive, aumento na produção de matéria seca de raízes que, dependendo da cultura, pode ser 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, permite melhorar a exploração e a absorção de P no solo pelas plantas (Vu et al., 2008). Ainda, o uso do N na adubação influencia a população e a atividade microbiana no solo, o que se reflete no aumento da taxa de decomposição dos resíduos vegetais. Como o P que compõe os tecidos vegetais encontra-se em compostos orgânicos, o processo de decomposição pelos microrganismos do solo é fundamental para sua mineralização e disponibilização (Keller et al., 2012).

A combinação de plantas de cobertura com doses de nitrogênio em SPD pode ter reflexos importantes na disponibilidade de P. Como parte dos reflexos está associada ao aumento da disponibilidade de P, e parte à diminuição, é preciso que sejam realizados estudos que permitam definir o balanço entre as formas de P em solos sob SPD, particularmente em sistemas estabelecidos, nos quais já ocorreu aumento no conteúdo de MO do solo.

A dinâmica do P no solo vem sendo estudada em função de sistemas de manejo em vários tipos de solos (Pavinato et al., 2009; Bravo et al., 2006; Gatiboni et al., 2007; Keller et al., 2012), mas o papel da adubação nitrogenada na disponibilidade de P em solos de regiões tropicais precisa ser mais bem avaliado porque nestes solos a capacidade de adsorção dos ânions fosfato aos

óxidos de ferro e de alumínio é regida pela acidez. A adubação nitrogenada é ainda um dos principais fatores que interferem na acidificação do solo e, em solos mais ácidos, há transformação de formas de P mais disponíveis para menos disponíveis. Medidas das alterações nas formas de P realizadas após 9 anos de aplicações anuais de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N em região de floresta de clima temperado permitiram constatar diminuição de formas orgânicas moderadamente lábeis de P, em virtude do aumento na taxa de mineralização, e aumento de formas inorgânicas moderadamente lábeis, em virtude da diminuição no valor de pH e do 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., 2015). Em solos intemperizados espera-se que o balanço também seja negativo, porém, com o cultivo das plantas de cobertura em SPD, espera-se um efeito mais atenuante, com manutenção de uma maior quantidade de P em formas disponíveis.

O objetivo deste trabalho foi avaliar alterações nas formas orgânicas e inorgânicas de P causadas pelo cultivo de plantas de cobertura e pelo uso de doses de nitrogênio em solo sob sistema de plantio direto.

## Material e Métodos

O experimento foi iniciado no segundo semestre de 2000 na fazenda experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal (21°15'22"S e 48°16'42"W). O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, cultivado em sistema de plantio direto desde a safra 1998/1999, no Campus da Unesp de Jaboticabal, SP. O clima da região é do tipo 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.

As características químicas e a granulometria do solo foram determinadas em amostras coletadas na camada de 0 a 20 cm, em área total, antes da instalação do experimento, e foram: P resina, 58 mg dm<sup>-3</sup>; MO, 20 g dm<sup>-3</sup>; pH em CaCl<sub>2</sub>, 4,5; K<sup>+</sup>, 3,1 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup>, 13 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup>, 6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H+Al, 47 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; CTC, 69 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V, 32%; argila, 474 g kg<sup>-1</sup>; silte, 27 g kg<sup>-1</sup>; e areia, 499 g kg<sup>-1</sup>. Os métodos usados

na caracterização química estão descritos em Raji et al. (2001), e a granulometria foi determinada segundo o método da pipeta (Donagema et al., 2011).

O experimento foi instalado com quatro repetições, em blocos ao acaso com parcelas subdivididas. Nas parcelas (tratamentos principais) foram considerados os seguintes tratamentos com plantas de cobertura, cultivadas em pré-safra à cultura do milho: crotalária (*Crotalaria juncea* L.), feijão-de-porco [*Canavalia ensiformis* (L.) D.C.], lablab (*Dolichos lablab* L.), milheto (*Pennisetum americanum* L.), mucuna-preta (*Mucuna aterrima* Piper & Tracy) e pousio (vegetação espontânea). As espécies mencionadas foram as que permaneceram por mais tempo em cultivo sucessivo: crotalária, feijão-de-porco, lablab e mucuna-preta por 10 anos; milheto e pousio por 12 anos. As alterações nas parcelas cultivadas com feijão-de-porco e lablab ocorreram nos dois primeiros anos, e em 2011/2012 a crotalária foi substituída por guandu-anão [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.], e a mucuna-preta por mucuna-cinza (*Mucuna cinerea* Piper & Tracy). Nas subparcelas (tratamentos secundários) foram consideradas as doses de N-ureia em cobertura na cultura do milho, equivalentes a 0 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N.

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. Nesta safra, as plantas de cobertura foram semeadas em SPD, em outubro de 2012. Todas as espécies foram semeadas com espaçamento de 0,50 m nas entrelinhas e dessecadas em janeiro de 2013. Na semeadura do milho, em janeiro de 2013, a adubação foi feita com 28 kg ha<sup>-1</sup> de N, 98 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 56 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

A amostragem de solo foi feita 30 dias após a dessecação das plantas de cobertura e antes da adubação em cobertura no milho, nas entrelinhas da cultura e nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm.

As amostras foram submetidas às determinações de P total (Kuo, 1996), e de formas orgânicas e inorgânicas de P segundo método de Hedley et al. (1982), com modificações de Condon e Goh (1989). Os extratores usados na determinação das formas de P foram: resina trocadora de ânions (RTA) em suspensão de solo e água (P<sub>RTA</sub>); NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (P<sub>bic</sub> e Po<sub>bic</sub>), NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (P<sub>NaOH I</sub> e Po<sub>NaOH I</sub>) e de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (P<sub>NaOH II</sub> e Po<sub>NaOH II</sub>), e HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (P<sub>HCl</sub>). No resíduo de solo obtido no final do fracionamento, a extração de P foi feita com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+HF+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (P residual). A lavagem

dos sedimentos entre cada extração foi feita com solução de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup>, conforme sugerido por Gatiboni et al. (2013). A determinação de P total após digestão dos extratos com K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, e de P inorgânico (Pi) nos extratos sem digerir, foi feita pelo método do azul de molibdênio. O P orgânico (Po) foi obtido por diferença entre o P total e o Pi. O Po no sobrenadante, após a extração de Pi com resina, não é quantificado no procedimento de Hedley et al. (1982), mas fez-se a opção por quantificá-lo porque, mesmo sendo pequeno, é a fração do Po mais solúvel, portanto, mais sujeita à degradação microbiana e disponibilização para as plantas. Esta fração foi designada como Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. A fração Pi<sub>NaOH</sub> foi determinada em extrato acidificado com solução de HCl 8 mol L<sup>-1</sup> até pH 1,0–1,5 e centrifugado a 2.500 rpm para precipitar os ácidos húmicos (Kovar & Pierzynski, 2009). Na interpretação dos resultados obtidos no fracionamento, as formas de P foram agrupadas em lábeis (P<sub>RTA</sub>, Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, P<sub>bic</sub> e Po<sub>bic</sub>), moderadamente lábeis (Pi e Po NaOH I e II) e não lábeis (P<sub>HCl</sub> e P residual), conforme sugerido por Cross & Schlesinger (1995).

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados segundo delineamento em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. 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. Para obtenção da proporção do Po que pode ser mineralizado via processo biológico, foi feito o cálculo da razão Po lábil/P lábil total (Cross & Schlesinger, 1995), em que Po lábil = Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub> + Po<sub>bic</sub> e P lábil total = Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+Po<sub>bic</sub>+P<sub>RTA</sub>+P<sub>bic</sub>.

## Resultados e Discussão

O teor total de P do solo, determinado segundo método de Kuo (1996), variou de 686 a 828 mg kg<sup>-1</sup> e não houve efeito de plantas de cobertura e de doses de N nos valores obtidos. O P total recuperado no fracionamento (soma das frações) representou de 88 a 113% do P total obtido por digestão ácida, com média de 101%, o que assegura a qualidade dos dados gerados no fracionamento. A taxa de recuperação obtida foi maior do que a relatada por Gatiboni et al. (2007) em solo cultivado em SPD, 68,5%, empregando os mesmos métodos. Essa maior taxa de recuperação obtida provavelmente foi devida à determinação

do  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  e à coleta e combinação das soluções de lavagem aos extratos, após a extração de cada fração.

Na avaliação dos efeitos das plantas de cobertura e das doses de N nas formas de P, não foram obtidas interações significativas (Tabela 1) e, por isso, os fatores plantas de cobertura e doses de N foram discutidos em separado. Não houve efeito das plantas de cobertura nos teores de  $\text{Pi}_{\text{RTA}}$  e  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$ , e  $\text{Pi}_{\text{bic}}$  e  $\text{Po}_{\text{bic}}$  (Tabelas 1 e 2), frações estas referentes ao compartimento do P lábil. Segundo Rheinheimer e Anghinoni (2001), o cultivo de plantas anuais tem pouco efeito na dinâmica das frações de Pi e, quando ele ocorre, não está propriamente associado à espécie de planta, mas à disponibilidade de N, que altera a produtividade de biomassa vegetal e a exportação de P.

A aplicação de N aumentou os teores de Pi lábil ( $\text{Pi}_{\text{RTA}}$  e  $\text{Pi}_{\text{bic}}$ ) na camada de 20–40 cm (Tabelas 1 e 2). 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 proporciona liberação e redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos suscetíveis à adsorção que as formas inorgânicas (Anghinoni, 2007). A redistribuição de Pi no perfil de solo em SPD tem sido relatada, e sua

ocorrência é atribuída à liberação de ácidos orgânicos, complexação do  $\text{Al}^{3+}$  trocável e decomposição das raízes no solo, em profundidade (Corrêa et al., 2004; Pavinato & Rosolem, 2008).

A adubação nitrogenada causou diminuição dos teores de  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  em todas as camadas, e aumento dos teores de  $\text{Po}_{\text{bic}}$  nas profundidades de 0–5, 5–10 e 10–20 cm (Tabelas 1 e 2). O aumento nos teores de  $\text{Po}_{\text{bic}}$  devido à aplicação de N pode ter resultado da transformação de P de outras formas orgânicas, tanto mais estáveis como menos estáveis. Admite-se que a aplicação de N, por estimular a atividade microbiana, pode provocar a transformação de formas de Po mais estáveis em formas orgânicas lábeis (Yang et al., 2015), mas, no caso, há também a possibilidade de migração de  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  para o  $\text{Po}_{\text{bic}}$ , via mineralização-imobilização, uma vez que o  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  diminuiu com a adubação nitrogenada e é a mais instável das formas de Po avaliadas. As frações orgânicas de  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  e  $\text{Po}_{\text{bic}}$  são correspondentes ao Po lábil, fração mais instável do Po e acessível aos microrganismos, que pode se tornar disponível para as plantas com maior facilidade.

A variação média observada nas formas  $\text{Pi}_{\text{RTA}}$  e  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$  em função da adubação nitrogenada foi de +1,27

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância (valores de F) para os efeitos de plantas de cobertura (PC) e de doses de N nas formas de P, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado em sistema de plantio direto desde a safra 1998/1999<sup>(1)</sup>.

| Fatores de variação | $\text{Pi}_{\text{RTA}}$ | $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$ | $\text{Pi}_{\text{bic}}$ | $\text{Po}_{\text{bic}}$ | $\text{Pi}_{\text{NaOH I}}$ | $\text{Po}_{\text{NaOH I}}$ | $\text{Pi}_{\text{NaOH II}}$ | $\text{Po}_{\text{NaOH II}}$ | $\text{Pi}_{\text{HCl}}$ | P residual         |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| Camada 0–5 cm       |                          |                                  |                          |                          |                             |                             |                              |                              |                          |                    |
| PC                  | 0,89 <sup>ns</sup>       | 0,65 <sup>ns</sup>               | 0,58 <sup>ns</sup>       | 2,36 <sup>ns</sup>       | 0,65 <sup>ns</sup>          | 7,28**                      | 0,66 <sup>ns</sup>           | 0,58 <sup>ns</sup>           | 1,20 <sup>ns</sup>       | 1,52 <sup>ns</sup> |
| N                   | 0,07 <sup>ns</sup>       | 31,00**                          | 4,28 <sup>ns</sup>       | 5,68*                    | 0,19 <sup>ns</sup>          | 0,17 <sup>ns</sup>          | 4,75*                        | 2,79 <sup>ns</sup>           | 0,01 <sup>ns</sup>       | 0,01 <sup>ns</sup> |
| PC x N              | 1,10 <sup>ns</sup>       | 0,26 <sup>ns</sup>               | 0,92 <sup>ns</sup>       | 0,76 <sup>ns</sup>       | 0,90 <sup>ns</sup>          | 0,45 <sup>ns</sup>          | 1,00 <sup>ns</sup>           | 0,38 <sup>ns</sup>           | 0,51 <sup>ns</sup>       | 1,50 <sup>ns</sup> |
| Camada 5–10 cm      |                          |                                  |                          |                          |                             |                             |                              |                              |                          |                    |
| PC                  | 0,35 <sup>ns</sup>       | 1,26 <sup>ns</sup>               | 0,17 <sup>ns</sup>       | 2,45 <sup>ns</sup>       | 0,25 <sup>ns</sup>          | 2,12                        | 0,83 <sup>ns</sup>           | 1,29 <sup>ns</sup>           | 0,99 <sup>ns</sup>       | 0,93 <sup>ns</sup> |
| N                   | 0,43 <sup>ns</sup>       | 37,50**                          | 2,00 <sup>ns</sup>       | 13,75**                  | 0,01 <sup>ns</sup>          | 0,16 <sup>ns</sup>          | 16,24**                      | 0,06 <sup>ns</sup>           | 2,50 <sup>ns</sup>       | 0,87 <sup>ns</sup> |
| PC x N              | 0,85 <sup>ns</sup>       | 0,10 <sup>ns</sup>               | 0,68 <sup>ns</sup>       | 1,62 <sup>ns</sup>       | 0,35 <sup>ns</sup>          | 0,49 <sup>ns</sup>          | 0,74 <sup>ns</sup>           | 1,02 <sup>ns</sup>           | 1,06 <sup>ns</sup>       | 0,26 <sup>ns</sup> |
| Camada 10–20 cm     |                          |                                  |                          |                          |                             |                             |                              |                              |                          |                    |
| PC                  | 0,47 <sup>ns</sup>       | 0,31 <sup>ns</sup>               | 0,44 <sup>ns</sup>       | 0,93 <sup>ns</sup>       | 0,36 <sup>ns</sup>          | 0,97 <sup>ns</sup>          | 0,74 <sup>ns</sup>           | 1,06 <sup>ns</sup>           | 1,12 <sup>ns</sup>       | 0,37 <sup>ns</sup> |
| N                   | 0,37 <sup>ns</sup>       | 14,04**                          | 1,30 <sup>ns</sup>       | 5,33*                    | 0,96 <sup>ns</sup>          | 1,51 <sup>ns</sup>          | 4,87*                        | 1,97 <sup>ns</sup>           | 0,92 <sup>ns</sup>       | 0,03 <sup>ns</sup> |
| PC x N              | 0,64 <sup>ns</sup>       | 0,85 <sup>ns</sup>               | 0,64 <sup>ns</sup>       | 0,42 <sup>ns</sup>       | 0,22 <sup>ns</sup>          | 0,44 <sup>ns</sup>          | 0,71 <sup>ns</sup>           | 0,54 <sup>ns</sup>           | 1,02 <sup>ns</sup>       | 2,30 <sup>ns</sup> |
| Camada 20–40 cm     |                          |                                  |                          |                          |                             |                             |                              |                              |                          |                    |
| PC                  | 0,37 <sup>ns</sup>       | 0,62 <sup>ns</sup>               | 0,55 <sup>ns</sup>       | 2,48 <sup>ns</sup>       | 0,33 <sup>ns</sup>          | 1,16 <sup>ns</sup>          | 0,52 <sup>ns</sup>           | 0,64 <sup>ns</sup>           | 0,88 <sup>ns</sup>       | 1,52 <sup>ns</sup> |
| N                   | 5,28**                   | 20,17**                          | 9,91**                   | 0,18 <sup>ns</sup>       | 0,04 <sup>ns</sup>          | 3,32 <sup>ns</sup>          | 8,00*                        | 0,03 <sup>ns</sup>           | 14,73**                  | 1,01 <sup>ns</sup> |
| PC x N              | 0,40 <sup>ns</sup>       | 0,37 <sup>ns</sup>               | 0,13 <sup>ns</sup>       | 1,78 <sup>ns</sup>       | 0,53 <sup>ns</sup>          | 0,52 <sup>ns</sup>          | 0,66 <sup>ns</sup>           | 2,44 <sup>ns</sup>           | 1,16 <sup>ns</sup>       | 0,64 <sup>ns</sup> |

<sup>(1)</sup> $\text{Pi}_{\text{RTA}}$ , P inorgânico extraído por resina trocadora de ânions;  $\text{Po}_{\text{H}_2\text{O}}$ , P orgânico solúvel em água;  $\text{Pi}_{\text{bic}}$ , P inorgânico extraído por solução de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Po}_{\text{bic}}$ , P orgânico extraído por solução de  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Pi}_{\text{NaOH I}}$ , P inorgânico extraído por  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Po}_{\text{NaOH I}}$ , P orgânico extraído por  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Pi}_{\text{NaOH II}}$ , P inorgânico extraído por solução de  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Po}_{\text{NaOH II}}$ , P orgânico extraído por solução de  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{Pi}_{\text{HCl}}$ , P inorgânico extraído com solução de  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ; P residual, P inorgânico e orgânico extraídos por  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{HF}$ . <sup>ns</sup>Não significativo. \* e \*\*Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

mg kg<sup>-1</sup> e -1,11 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Isso sugere a possibilidade de mineralização do Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub> e transferência para o Pi<sub>RTA</sub>. Apesar de os valores absolutos de aumento e diminuição terem sido muito semelhantes em todas as camadas, o aumento percentual no Pi 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 Pi apenas na camada de 20–40 cm, em virtude dos menores teores de P. A alta labilidade das formas extraídas com bicarbonato é relatada pela maioria dos autores que trabalharam com fracionamento de P, indicando que o teor de Pi<sub>RTA</sub>, sozinho, não representa o P disponível

do solo (Redel et al., 2007; Gonçalves & Meurer, 2009; Pavinato et al., 2009).

Houve maior participação do Po no P lábil na camada de 20–40 cm (Tabela 2), o que pode ser explicado pela adubação fosfatada, cujo efeito limita-se à camada superficial (0–20 cm), aumentando o teor de Pi lábil e diminuindo o Po lábil (Cross & Schlesinger, 1995).

A soma das formas de Po<sub>NaOH</sub> (Po<sub>NaOH I</sub> + Po<sub>NaOH II</sub>), particularmente a fração Po<sub>NaOH I</sub>, representou a maior parte do Po<sub>Total</sub>, comportamento semelhante ao que foi observado com as formas inorgânicas, em que os teores de Pi<sub>NaOH</sub> foram os maiores entre as formas de Pi

**Tabela 2.** Teores de P lábil do solo, extraídos com resina trocadora de ânions (RTA), água e solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de plantas de cobertura e doses de N, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado em sistema de plantio direto desde a safra 1998/99<sup>(1)</sup>.

| Plantas de cobertura  | Pi <sub>RTA</sub> <sup>(2)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                               | Po <sub>H<sub>2</sub>O</sub> <sup>(2)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                | Pi <sub>bic</sub> <sup>(3)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                | Po <sub>bic</sub> <sup>(3)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                | Po/P lábil <sup>(4)</sup> (%) |                |
|-----------------------|---|-------------------------------|--|----------------|---|----------------|---|----------------|-------------------------------|----------------|
|                       | N <sub>0</sub> <sup>(5)</sup>                           | N <sub>1</sub> <sup>(6)</sup> | N <sub>0</sub>   | N <sub>1</sub> | N <sub>0</sub>  | N <sub>1</sub> | N <sub>0</sub>  | N <sub>1</sub> | N <sub>0</sub>                | N <sub>1</sub> |
| Camada 0–5 cm         |   |                               |  |                |   |                |   |                |                               |                |
| Crotalária            | 17,25   | 21,25                         | 2,50   | 0,75           | 10,75   | 15,00          | 8,50  | 11,75          | 41                            | 32             |
| Lablab                | 14,25   | 13,50                         | 2,25   | 1,25           | 9,00  | 11,50          | 10,75   | 13,25          | 37                            | 37             |
| Mucuna                | 13,75   | 16,25                         | 2,50   | 1,00           | 8,00  | 13,25          | 12,25   | 11,25          | 25                            | 31             |
| Feijão-de-porco       | 15,00   | 19,00                         | 2,50   | 1,25           | 10,75   | 14,75          | 8,25  | 11,50          | 29                            | 28             |
| Milheto               | 18,75   | 18,25                         | 1,75   | 0,75           | 11,50   | 14,00          | 9,25  | 10,75          | 30                            | 29             |
| Pousio <sup>(7)</sup> | 20,75   | 14,00                         | 2,25   | 1,00           | 13,75   | 10,75          | 7,50  | 8,75           | 31                            | 32             |
| Média                 | 16,63   | 17,04                         | 2,29a  | 1,00b          | 10,62   | 13,20          | 9,42b   | 11,20a         | 32                            | 31             |
| Camada 5–10 cm        |   |                               |  |                |   |                |   |                |                               |                |
| Crotalária            | 15,50   | 23,50                         | 2,50   | 1,00           | 13,75   | 24,75          | 7,50  | 11,50          | 34                            | 23             |
| Lablab                | 18,00   | 13,50                         | 2,25   | 1,00           | 17,25   | 14,75          | 9,00  | 9,75           | 27                            | 32             |
| Mucuna                | 17,00   | 19,75                         | 2,25   | 1,00           | 14,25   | 23,00          | 11,00   | 10,75          | 24                            | 26             |
| Feijão-de-porco       | 16,75   | 18,25                         | 1,75   | 0,50           | 16,25   | 20,00          | 7,00  | 9,00           | 27                            | 23             |
| Milheto               | 15,50   | 24,00                         | 2,00   | 0,75           | 13,00   | 22,75          | 7,00  | 11,75          | 32                            | 25             |
| Pousio                | 21,75   | 16,00                         | 2,25   | 1,25           | 20,50   | 16,75          | 7,75  | 10,00          | 24                            | 28             |
| Média                 | 17,41   | 19,16                         | 2,16a  | 0,91b          | 15,83   | 20,33          | 8,20b   | 10,45a         | 28                            | 26             |
| Camada 10–20 cm       |   |                               |  |                |   |                |   |                |                               |                |
| Crotalária            | 10,25   | 15,75                         | 1,00   | 1,00           | 11,25   | 18,75          | 9,25  | 12,50          | 33                            | 30             |
| Lablab                | 12,50   | 11,25                         | 2,25   | 0,50           | 11,75   | 12,00          | 8,50  | 9,50           | 32                            | 33             |
| Mucuna                | 14,00   | 12,75                         | 1,75   | 1,00           | 13,25   | 15,50          | 10,00   | 11,25          | 32                            | 30             |
| Feijão-de-porco       | 12,00   | 19,00                         | 1,75   | 0,75           | 12,00   | 16,00          | 8,50  | 9,25           | 24                            | 31             |
| Milheto               | 14,75   | 16,75                         | 1,50   | 0,50           | 15,00   | 13,75          | 7,75  | 10,75          | 37                            | 30             |
| Pousio                | 16,50   | 12,50                         | 1,75   | 0,50           | 16,25   | 15,25          | 9,25  | 10,00          | 31                            | 33             |
| Média                 | 13,33   | 14,66                         | 1,66a  | 0,70b          | 13,25   | 15,20          | 8,88b   | 10,54a         | 32                            | 31             |
| Camada 20–40 cm       |   |                               |  |                |   |                |   |                |                               |                |
| Crotalária            | 4,50  | 7,50                          | 1,50   | 1,00           | 5,50  | 8,00           | 6,00  | 10,00          | 59                            | 40             |
| Lablab                | 3,75  | 5,75                          | 1,50   | 0,25           | 5,25  | 7,00           | 8,00  | 8,50           | 50                            | 41             |
| Mucuna                | 4,50  | 5,50                          | 1,50   | 0,50           | 6,25  | 8,00           | 13,50   | 8,75           | 49                            | 41             |
| Feijão-de-porco       | 5,25  | 7,75                          | 1,00   | 0,25           | 5,25  | 6,75           | 5,75  | 7,00           | 45                            | 42             |
| Milheto               | 5,75  | 6,25                          | 1,25   | 0,00           | 6,50  | 7,50           | 8,50  | 8,50           | 47                            | 44             |
| Pousio                | 5,00  | 5,50                          | 1,25   | 0,50           | 5,50  | 7,50           | 7,25  | 8,50           | 44                            | 43             |
| Média                 | 4,79b   | 6,37a                         | 1,33a  | 0,41b          | 5,70b   | 7,45a          | 8,16  | 8,54           | 49                            | 42             |

<sup>(1)</sup>Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup>Pi<sub>RTA</sub> e Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, P inorgânico extraído por resina trocadora de ânions e P orgânico solúvel em água. <sup>(3)</sup>Pi<sub>bic</sub> e Po<sub>bic</sub>, P inorgânico e orgânico extraídos por solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>. <sup>(4)</sup>Po/P lábil = [(Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+Po<sub>bic</sub>)/(Po<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+Po<sub>bic</sub>+Pi<sub>RTA</sub>+Pi<sub>bic</sub>)]. <sup>(5)</sup>N<sub>0</sub>, 0 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(6)</sup>N<sub>1</sub>, 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(7)</sup>Vegetação espontânea.

(Tabela 3). Maiores teores de Pi e Po no compartimento moderadamente lábil também foram observados em outros solos (Santos et al., 2008; Gonçalves & Meurer, 2009), nos quais a predominância do  $P_{NaOH}$  foi associada ao fato de serem as formas de P, orgânicas e inorgânicas, ligadas ao solo com alta energia.

Nos primeiros 5 cm de profundidade, o cultivo de crotalária resultou em maiores teores de  $P_{NaOH I}$  em relação ao milheto e à área de pousio. Os aumentos foram de 21 e 35 mg kg<sup>-1</sup> de  $P_{NaOH I}$ , ou 32% e 68%, respectivamente. O cultivo das outras espécies de leguminosas resultou em efeito semelhante ao obtido

com o milheto, mas os teores de  $P_{NaOH I}$  com o cultivo das leguminosas, exceto feijão-de-porco, foram maiores do que os obtidos com o pousio (Tabelas 1 e 3). Nesta camada, 0–5 cm, ocorreram os maiores teores de  $P_{NaOH I}$  e, nas demais, não houve efeito das plantas de cobertura. O acúmulo de Po na camada superficial do solo ocorre quando ele é cultivado por longo período de tempo em SPD (Redel et al., 2007; Zamuner et al., 2008) por causa da deposição sucessiva de resíduos culturais na superfície do solo e do revolvimento do solo apenas no sulco de semeadura (Rheinheimer & Anghinoni, 2001), condição que existe há mais de

**Tabela 3.** Teores de P moderadamente lábil do solo, extraídos pelos extratores NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, em função de plantas de cobertura e doses de N, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado em sistema de plantio direto desde a safra 1998/1999<sup>(1)</sup>.

| Plantas de cobertura  | $P_{iNaOH I}^{(2)}$ (mg kg <sup>-1</sup> ) |             | $P_{oNaOH I}^{(2)}$ (mg kg <sup>-1</sup> ) |       |                     | $P_{iNaOH II}^{(3)}$ (mg kg <sup>-1</sup> ) |         | $P_{oNaOH II}^{(3)}$ (mg kg <sup>-1</sup> ) |       |
|-----------------------|--|-------------|--|-------|---------------------|---|---------|---|-------|
|                       | $N_0^{(4)}$                                | $N_1^{(5)}$ | $N_0$                                      | $N_1$ | Média               | $N_0$                                       | $N_1$   | $N_0$                                       | $N_1$ |
| Camada 0–5 cm         |  |             |  |       |                     |   |         |   |       |
| Crotalária            | 89,75                                      | 91,75       | 93,75                                      | 81,00 | 87,37a <sup>5</sup> | 97,25                                       | 103,75  | 31,25                                       | 36,00 |
| Lablab                | 79,00                                      | 79,50       | 81,00                                      | 70,00 | 75,50ab             | 90,25                                       | 98,00   | 39,00                                       | 47,25 |
| Mucuna                | 78,50                                      | 90,75       | 81,00                                      | 64,00 | 72,50ab             | 94,25                                       | 96,25   | 43,00                                       | 39,75 |
| Feijão-de-porco       | 92,50                                      | 90,25       | 76,75                                      | 66,75 | 71,75abc            | 93,25                                       | 107,25  | 42,50                                       | 51,50 |
| Milheto               | 91,75                                      | 86,50       | 69,00                                      | 63,00 | 66,00bc             | 97,25                                       | 96,75   | 41,50                                       | 48,00 |
| Pousio <sup>(6)</sup> | 99,75                                      | 81,25       | 45,25                                      | 59,00 | 52,12c              | 108,75                                      | 108,75  | 24,50                                       | 40,25 |
| Média                 | 88,54                                      | 86,66       | 74,46                                      | 67,29 | -                   | 96,83b                                      | 101,79a | 36,95                                       | 43,79 |
| Camada 5–10 cm        |  |             |  |       |                     |   |         |   |       |
| Crotalária            | 108,25                                     | 108,00      | 67,25                                      | 53,25 | -                   | 90,75                                       | 106,50  | 33,25                                       | 41,75 |
| Lablab                | 114,00                                     | 97,50       | 50,00                                      | 49,00 | -                   | 95,25                                       | 98,25   | 33,75                                       | 46,25 |
| Mucuna                | 102,25                                     | 121,25      | 43,50                                      | 51,00 | -                   | 100,00                                      | 107,25  | 30,50                                       | 21,00 |
| Feijão-de-porco       | 113,50                                     | 110,00      | 56,50                                      | 46,25 | -                   | 98,50                                       | 115,50  | 34,25                                       | 29,50 |
| Milheto               | 102,25                                     | 123,25      | 66,75                                      | 61,00 | -                   | 90,25                                       | 112,50  | 51,00                                       | 32,50 |
| Pousio                | 121,00                                     | 111,00      | 56,75                                      | 66,75 | -                   | 104,75                                      | 123,50  | 24,50                                       | 29,00 |
| Média                 | 110,70                                     | 111,83      | 56,79                                      | 54,54 | -                   | 96,58b                                      | 110,58a | 34,54                                       | 33,33 |
| Camada 10–20 cm       |  |             |  |       |                     |   |         |   |       |
| Crotalária            | 100,00                                     | 98,25       | 85,50                                      | 61,25 | -                   | 90,50                                       | 94,50   | 39,00                                       | 24,50 |
| Lablab                | 99,25                                      | 92,25       | 54,50                                      | 46,00 | -                   | 91,50                                       | 99,00   | 21,25                                       | 30,25 |
| Mucuna                | 101,75                                     | 102,50      | 47,75                                      | 35,50 | -                   | 99,50                                       | 96,75   | 35,25                                       | 20,25 |
| Feijão-de-porco       | 102,50                                     | 96,25       | 74,25                                      | 42,25 | -                   | 92,25                                       | 112,00  | 35,50                                       | 31,75 |
| Milheto               | 110,00                                     | 101,25      | 62,25                                      | 53,25 | -                   | 92,25                                       | 106,50  | 61,75                                       | 37,00 |
| Pousio                | 119,25                                     | 92,00       | 36,00                                      | 50,00 | -                   | 109,25                                      | 117,00  | 33,25                                       | 27,75 |
| Média                 | 105,45                                     | 97,08       | 60,04                                      | 48,04 | -                   | 95,87b                                      | 104,29a | 37,66                                       | 28,58 |
| Camada 20–40 cm       |  |             |  |       |                     |   |         |   |       |
| Crotalária            | 59,50                                      | 63,25       | 79,50                                      | 48,75 | -                   | 80,25                                       | 92,50   | 38,75                                       | 27,75 |
| Lablab                | 60,75                                      | 66,50       | 51,75                                      | 50,75 | -                   | 81,00                                       | 93,75   | 14,25                                       | 44,75 |
| Mucuna                | 62,00                                      | 69,00       | 46,25                                      | 31,00 | -                   | 87,25                                       | 90,25   | 22,50                                       | 25,50 |
| Feijão-de-porco       | 62,75                                      | 57,00       | 54,25                                      | 52,00 | -                   | 82,75                                       | 97,25   | 34,50                                       | 29,00 |
| Milheto               | 69,75                                      | 60,50       | 58,00                                      | 49,00 | -                   | 87,00                                       | 90,00   | 51,25                                       | 29,00 |
| Pousio                | 63,75                                      | 66,50       | 45,50                                      | 36,50 | -                   | 96,75                                       | 99,50   | 28,50                                       | 29,00 |
| Média                 | 63,08                                      | 63,79       | 55,87                                      | 44,66 | -                   | 85,83b                                      | 93,87a  | 31,62                                       | 30,83 |

<sup>(1)</sup>Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup> $P_{iNaOH I}$  e  $P_{oNaOH I}$ , P inorgânico e orgânico extraídos por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. <sup>(3)</sup> $P_{iNaOH II}$  e  $P_{oNaOH II}$ , P inorgânico e orgânico extraídos por solução de NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>. <sup>(4)</sup> $N_0$ , 0 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(5)</sup> $N_1$ , 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(6)</sup>Vegetação espontânea.

12 anos na área amostrada. O maior teor de Po na camada superficial pode ter origem também na maior atividade da biomassa microbiana, que é responsável pela produção de compostos orgânicos fosfatados a partir do Pi existente nos tecidos das plantas (Tiecher et al., 2012).

O aumento na fração de  $Po_{NaOH\ I}$  com o cultivo de crotalária, mas não com milho (Tabela 3), deve estar associado à qualidade química do resíduo, uma vez que a quantidade de P imobilizada nesta fração é dependente dos teores de lignina e polifenóis e das relações C/N e C/P, que definem a suscetibilidade do resíduo à decomposição e liberação de nutrientes (Matos et al., 2011). Características como elevada produção de biomassa (Perin et al., 2010; Teodoro et al., 2011), maior teor de P solúvel no tecido, associação com fungos micorrízicos (Redel et al., 2007) e baixa relação C/N em relação às gramíneas (Perin et al., 2010) são justificativas para maior mobilização e ciclagem de P pelas leguminosas, com destaque, no caso, para a crotalária.

O aumento do  $Po_{NaOH\ I}$  com o cultivo das plantas de cobertura (Tabelas 1 e 3) indica que, por meio da imobilização, o reservatório de Po (fator quantidade) aumentou, e que, por mineralização, pode haver tamponamento das formas mais lábeis de Pi (Novais et al., 2007). Gonçalves & Meurer (2009) determinaram coeficientes de correlação de 0,73\*\* entre P acumulado em plantas de arroz e formas de P extraídas por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Tiecher et al. (2012), em área com cultivo de plantas de cobertura, verificaram que a maior parte do fosfato aplicado via fertilizantes foi convertida à Po, em vez de ser adsorvida pela fração mineral do solo, e que o aumento ocorreu no Po lábil, extraído por NaOH, e no P residual. A participação do Po lábil no P disponível foi demonstrada por Tokura et al. (2011), que determinaram que, entre as formas orgânicas, apenas o  $Po_{NaOH\ I}$  contribuiu para nutrição de plantas de arroz. No entanto, formas de P de menor labilidade, como o  $Po_{NaOH\ II}$ , também podem contribuir para o tamponamento do P absorvido pelas plantas quando o balanço entre as entradas e saídas de P no sistema for negativo (Gatiboni et al., 2013).

A adubação nitrogenada aumentou as formas de  $Pi_{NaOH\ II}$  em todas as camadas de solo amostradas (Tabelas 1 e 3). 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<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup> nas formas de  $Po_{NaOH\ II}$ . A variação observada permite supor que a adubação com N aumentou a mineralização de  $Po_{NaOH\ I}$  pelos microrganismos do solo e que parte do Pi gerado foi readsorvido, repondo as frações inorgânicas de  $Pi_{NaOH\ II}$ , e parte foi reimmobilizado e transformado em  $Po_{bic}$ , cujo aumento em função da adubação nitrogenada já foi comentado (Tabela 2). Gatiboni et al. (2007) verificaram diminuição nos teores de  $Po_{NaOH\ I}$  e  $Po_{NaOH\ II}$ , e aumento nos teores de  $Pi_{NaOH\ I}$ , atribuindo esse resultado à adsorção de P oriundo da mineralização do Po, nas formas de  $Pi_{NaOH\ I}$  e  $Pi_{NaOH\ II}$ . Os autores observaram que em solo com e sem adubação fosfatada, respectivamente, 46% e 75% do P absorvido pelas plantas foi originado das formas orgânicas, mas alertaram que, mesmo que as formas mais recalcitrantes de P tenham contribuído para absorção vegetal, as taxas de desorção não são adequadas para suprir as necessidades nutricionais das plantas.

A fração não lábil de P é constituída de P extraído pela solução de HCl 1 mol L<sup>-1</sup> ( $Pi_{HCl}$ ), praticamente formas de P ligadas ao cálcio (Cross & Schlesinger, 1995), e de P residual. Os teores de  $Pi_{HCl}$  obtidos (Tabela 4) foram maiores que os relatados por outros autores (Gatiboni et al., 2007; Tokura et al., 2011). De modo geral, essa fração tem participação pequena no P total e na disponibilidade de P para as plantas, embora Rheinheimer & Anghinoni (2001) tenham relatado que em solos em SPD, no Sul do Brasil, há incremento de formas de  $Pi_{HCl}$  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 devida ao incremento de Ca<sup>2+</sup> acontece em situação de neutralidade-alcalinidade do solo (Vu et al., 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.

O cultivo de espécies leguminosas e gramíneas em cobertura não causou variação significativa nos teores de  $Pi_{HCl}$  (Tabelas 1 e 4). Por outro lado, houve aumento de 3 mg kg<sup>-1</sup> desta forma na profundidade de 20–40 cm em virtude da adubação nitrogenada (Tabela 4). Pavinato et al. (2009), 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  $P_{iHCl}$ . Embora a adubação nitrogenada tenha causado aumento na forma  $P_{iHCl}$  na profundidade de 20–40 cm, a relevância desse aumento para o P disponível para as

plantas é pequena, pois, somado ao P residual, o  $P_{iHCl}$  compõe a parte mais recalcitrante de P do solo.

Não houve variação significativa nos teores de P residual em virtude do cultivo de plantas de cobertura e do uso de adubação nitrogenada, em todas as profundidades de solo avaliadas (Tabelas 1 e 4). O P residual é uma fração 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), mas a maior parte do P total determinado estava nesta fração, ou seja, 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 4.** Teores de P não lábil do solo, obtidos com os extratores HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HF, em função de plantas de cobertura e doses de N, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm de um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado em sistema de plantio direto desde a safra 1998/1999<sup>(1)</sup>.

| Plantas de cobertura  | $P_{iHCl}^{(2)}$ (mg kg <sup>-1</sup> ) |                               | P residual H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + HF <sup>(3)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> ) |                |
|-----------------------|---|-------------------------------|--|----------------|
|                       | N <sub>0</sub> <sup>(4)</sup>           | N <sub>1</sub> <sup>(5)</sup> | N <sub>0</sub>   | N <sub>1</sub> |
| Camada 0–5 cm         |   |                               |  |                |
| Crotalária            | 25,75                                   | 22,00                         | 335,00   | 345,50         |
| Lablab                | 12,00                                   | 15,00                         | 405,50   | 365,25         |
| Mucuna                | 20,50                                   | 18,75                         | 371,25   | 423,00         |
| Feijão-de-porco       | 20,75                                   | 24,75                         | 372,50   | 376,25         |
| Milheto               | 21,75                                   | 21,25                         | 383,00   | 423,50         |
| Pousio <sup>(6)</sup> | 11,50                                   | 31,00                         | 389,25   | 330,25         |
| Média                 | 20,33                                   | 20,50                         | 376,08   | 377,29         |
| Camada 5–10 cm        |   |                               |  |                |
| Crotalária            | 23,00                                   | 19,50                         | 351,25   | 352,75         |
| Lablab                | 10,25                                   | 11,00                         | 388,25   | 373,25         |
| Mucuna                | 18,00                                   | 18,00                         | 356,75   | 371,25         |
| Feijão-de-porco       | 14,00                                   | 19,50                         | 396,00   | 366,50         |
| Milheto               | 12,50                                   | 19,00                         | 363,25   | 342,50         |
| Pousio                | 14,75                                   | 20,75                         | 382,25   | 350,00         |
| Média                 | 15,41                                   | 17,95                         | 372,95   | 359,37         |
| Camada 10–20 cm       |   |                               |  |                |
| Crotalária            | 18,25                                   | 15,00                         | 358,75   | 379,75         |
| Lablab                | 6,50                                    | 9,75                          | 405,25   | 352,00         |
| Mucuna                | 14,75                                   | 10,75                         | 358,75   | 379,50         |
| Feijão-de-porco       | 13,50                                   | 18,25                         | 353,00   | 385,50         |
| Milheto               | 10,50                                   | 14,50                         | 359,75   | 355,25         |
| Pousio                | 12,07                                   | 16,75                         | 362,00   | 354,75         |
| Média                 | 12,58                                   | 14,16                         | 366,25   | 367,79         |
| Camada 20–40 cm       |   |                               |  |                |
| Crotalária            | 7,50                                    | 9,00                          | 366,75   | 355,75         |
| Lablab                | 4,75                                    | 8,00                          | 378,75   | 381,50         |
| Mucuna                | 7,00                                    | 7,75                          | 395,25   | 372,25         |
| Feijão-de-porco       | 8,00                                    | 9,75                          | 362,75   | 383,25         |
| Milheto               | 7,00                                    | 13,00                         | 392,25   | 359,25         |
| Pousio                | 6,25                                    | 11,25                         | 350,75   | 335,75         |
| Média                 | 6,75a                                   | 9,79b                         | 374,41   | 364,62         |

<sup>(1)</sup>Médias seguidas por letras iguais, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup> $P_{iHCl}$ , P inorgânico extraído com solução de HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup>. <sup>(3)</sup>P residual, P inorgânico e orgânico extraídos por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + HF. <sup>(4)</sup>N<sub>0</sub>, 0 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(5)</sup>N<sub>1</sub>, 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. <sup>(6)</sup>Vegetação espontânea.

## Conclusões

1. O cultivo de crotalária (*Crotalaria juncea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Dolichos lablab*) e mucuna (*Mucuna aterrima*) e milheto (*Pennisetum americanum*) em pré-safra de milho não causa alteração na maior parte das formas de P do solo mesmo após 12 anos de aplicação dos tratamentos.

2. O cultivo de crotalária, lablab e mucuna como plantas de cobertura em pré-safra de milho aumenta o P orgânico moderadamente lábil na camada superficial do solo, em relação ao pousio (vegetação espontânea).

3. A adubação nitrogenada em cobertura no milho não causa alteração na maior parte das formas de P do solo mesmo após 12 anos de aplicação dos tratamentos, mas 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 (P resina).

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa; e à Fundação Agricultura Sustentável (Agrisus, projeto 1336/14), pelo apoio financeiro.

## Referências

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS,



- N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.873-928.
- BRAVO, C.; TORRENT, J.; GIRÁLDEZ, J.V.; GONZÁLEZ, P.; ORDÓÑEZ, R. Long-term effect of tillage on phosphorus forms and sorption in a Vertisol of southern Spain. **European Journal of Agronomy**, v.25, p.264-269, 2006. DOI: 10.1016/j.eja.2006.06.003.
- BORKERT, C.M.; GAUDÊNCIO, C. de A.; PEREIRA, J.E.; PEREIRA, L.R.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.143-153, 2003. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000100019.
- CONDON, 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. **European Journal of Soil Science**, v.40, p.383-395, 1989. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1989.tb01282.x.
- 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**, v.39, p.1231-1237, 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004001200010.
- 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**, v.64, p.197-214, 1995. DOI: 10.1016/0016-7061(94)00023-4.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).
- GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v.8, p.141-187.
- GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. dos S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-699, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000400010.
- GATIBONI, L.C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; FLORES, A.F.C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M.A.S. de. Phosphorus forms and availability assessed by <sup>31</sup>P-NMR in successively cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.2625-2640, 2005. DOI: 10.1080/00103620500301917.
- 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**, v.33, p.357-362, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000200013.
- 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 American Journal**, v.46, p.970-976, 1982. DOI: 10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x.
- KELLER, M.; OBERSON, A.; ANNAHEIM, K.E.; 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**, v.175, p.385-393, 2012. DOI: 10.1002/jpln.201100177.
- KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. 2<sup>nd</sup> ed. [Virginia]: Virginia Technical University Press, 2009. 122p. (Southern Cooperative Series Bulletin No. 408).
- 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. (Ed.) **Methods of soil analysis: part 3 - chemical methods**. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1996. p.869-920.
- 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 and Tillage Research**, v.90, p.171-183, 2006. DOI: 10.1016/j.still.2005.09.001.
- MATOS, E. da S.; MENDONÇA, E. de S.; CARDOSO, I.M.; LIMA, P.C. de; FREESE, D. Decomposition and nutrient release of leguminous plants in coffee agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.141-149, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100013.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.
- PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.149-155, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2009.07.001.
- 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**, v.32, p. 911-920, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000300001.
- 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 crotalaria e milho solteiros e consorciados. **Revista Ceres**, v.57, p.274-281, 2010. DOI: 10.1590/S0034-737X2010000200020.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 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**, v.139, p.388-396, 2007. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.02.018.
- RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001. DOI: 10.1590/S0100-204X2001000100019.
- SANTOS, J.Z.L.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V. de; CURTI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G. de A. Frações

de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.705-714, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000200025.

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M.R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v.101, p.160-171, 2007. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.11.003.

TEODORO, R.B.; OLIVEIRA, F.L. de; SILVA, D.M.N. da; 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**, v.35, p.635-643, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200032.

TIECHER, T.; SANTOS, D.R. dos; 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**, v.36, p.271-281, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000100028.

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**, v.33, p.171-179, 2011. DOI: 10.4025/actasciagron.v33i1.1435.

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**, v.304, p.21-34, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9516-x.

YANG, K.; ZHU, J.; GU, J.; YU, L.; WANG, Z. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. **Annals of Forest Science**, v.72, p.435-442, 2015. DOI: 10.1007/s13595-014-0444-7.

ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v.99, p.131-138, 2008. DOI: 10.1016/j.still.2007.12.006.

---

Recebido em 26 de agosto de 2015 e aprovado em 1 de julho de 2016