

Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo⁽¹⁾

Alessandra Mayumi Tokura⁽²⁾, Antonio Eduardo Furtini Neto⁽²⁾, Nilton Curi⁽²⁾, Valdemar Faquin⁽²⁾, Carlos Hissao Kurihara⁽³⁾ e Alves Alexandre Alovisi⁽⁴⁾

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estudar, pelo método de extração seqüencial, as alterações das formas de P em amostras de solo sob plantio direto (PD) por diferentes tempos de cultivo, em duas profundidades, em relação às amostras de solos de áreas adjacentes nunca cultivadas (referenciais). As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm de um Neossolo Quartzarênico, com um ano de PD; de dois Latossolos Vermelho distróficos com três e cinco anos de PD; e de dois Latossolos Vermelho distroférricos, com sete e 11 anos de PD, e das respectivas áreas adjacentes nunca cultivadas. O método de fracionamento de P foi eficiente para avaliar os efeitos do manejo na dinâmica das alterações das formas de P no solo. As formas de P dos solos apresentaram tendência de redução com a profundidade. Com o tempo de cultivo sob PD, em uma mesma classe de solo, a participação das formas de P não-lábeis em relação ao P total tendeu a diminuir, sendo acompanhada por um aumento relativo das formas mais lábeis.

Termos para indexação: adubo fosfatado, método de análise, manejo do solo, extração seqüencial, classe do solo.

Phosphorus forms on soil under no-till as a function of the depth and of cultivation time

Abstract – The objective of this work was to study by the method of sequential extraction the alterations in P forms on soils as a function of time of cultivation and of two sampling depths under no-till (NT), in comparison with never-cultivated adjacent (referential) areas. The soil samples were collected at 0-5 and 5-10 cm depths in a Quartzarenic Neosol (Entisol), with one year of NT; two dystrophic Red Latosols (Oxisols) with three and five years of NT; and two dystroferic Red Latosols (Oxisols), with seven and 11 years of NT, and of the respective never-cultivated areas. The method of P fractionation was efficient to evaluate the effects of management in the dynamics of the P alterations in the soil. The P forms in the soils, showed decrease with depth, and with time of cultivation under NT, for the same soil class; the participation of non-labile P forms in relation to total P tended to decrease, being accompanied by a relative increase in more labile forms.

Index terms: phosphate fertilizer, analysis method, soil management, sequential extraction, soil class.

Introdução

Difundido em nosso meio mais como medida de controle à erosão do que como um sistema de culti-

vo propriamente dito, o plantio direto (PD) foi introduzido sem que houvesse informações básicas sobre a dinâmica de nutrientes no sistema. Informações sobre o manejo da fertilidade do solo são ainda escassas no Brasil, e carecem de subsídios para a avaliação das modificações que ocorrem no ecossistema solo-planta. A adoção do sistema tem promovido mudanças nos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos (Muzilli, 1983).

No Brasil, os estudos pioneiros de Ramos (1976) mostraram a eficiência do PD no controle das perdas de solo por erosão. Posteriormente, Muzilli (1985), avaliando a fertilidade do solo neste sistema, constatou diferenças significativas quanto ao acúmulo

⁽¹⁾ Aceito para publicação em 26 de abril de 2002.

⁽²⁾ Universidade Federal de Lavras, Dep. de Ciência do Solo, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras, MG. Bolsista do CNPq. E-mail: amtokura@zipmail.com.br, afurtini@ufla.br, niltcuri@ufla.br, vafaquin@ufla.br

⁽³⁾ Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste, Caixa Postal 661, CEP 79804-970 Dourados, MS. E-mail: kurihara@vicosa.br

⁽⁴⁾ SNP Consultoria, Av. D. Pedro II, 100, CEP 78740-200 Rondonópolis, MT. E-mail: alovisi@terra.com.br

de nutrientes no PD em relação ao preparo convencional. Entre os nutrientes avaliados, o P apresentou altos teores, sendo quatro a sete vezes superiores aos encontrados no preparo convencional na camada de 0-5 cm; isto sugere a possibilidade de reduzir a adubação fosfatada no plantio direto. Nesta situação, sentiu-se a necessidade de conhecer os efeitos deste sistema de cultivo ao longo do tempo, na disponibilidade do fósforo. O conhecimento da natureza e da distribuição das formas de P no solo pode fornecer informações importantes para o processo de avaliação da disponibilidade do P (Machado et al., 1993).

Uma abordagem moderna para a compreensão da dinâmica do P é dividi-lo em frações, pelo uso de soluções extratoras de diferentes composições e capacidades de extração, dada a complexidade do comportamento deste nutriente no solo (Silva & Raij, 1999).

O uso do solo, as remoções de P pelas plantas e as aplicações de fertilizantes fosfatados alteram a dinâmica das transformações de P no solo (Tiessen et al., 1983).

O fracionamento do P do solo tem sido utilizado para estudar estas transformações (Chang & Jackson, 1957; Hedley et al., 1982). O método proposto por Hedley et al. (1982) tem como vantagem o fato de relacionar as formas de P no solo à sua disponibilidade para as plantas, além de quantificar o P orgânico lábil no solo.

O objetivo deste trabalho foi estudar as alterações das formas de P em solos sob plantio direto (PD), por diferentes tempos de cultivo em duas profundidades, com relação a áreas adjacentes nunca cultivadas (referenciais).

Material e Métodos

Foram selecionados solos representativos em áreas cultivadas sob plantio direto com soja e milho e em áreas adjacentes nunca cultivadas, como referência. Foram estudadas duas profundidades (0-5 e 5-10 cm) e três classes de solo [Neossolo Quartzarênico (RQ); Latossolo Vermelho distrófico (LVd); e Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf)], conforme Embrapa (1999), localizados nos municípios de Itiquira (MT), Alto Garças (MT) e Maracaju (MS), respectivamente. Nas áreas não-cultivadas, a vege-

tação nativa era cerrado tropical no RQ e LVd, e floresta tropical, no LVdf.

Em cada área de estudo delimitou-se uma subárea de amostragem de 100x100 m. Nas subáreas cultivadas, escolheram-se três linhas de plantio com aproximadamente 65 dias de emergência da soja (estágio-de-canivetinho), com espaços entre si de 50 m, amostrando-se em cada uma delas três pontos, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, perfazendo nove pontos amostrais, sob sistema de produção que envolveu aplicações de calcário, ocasionalmente, e adubações anuais. Os fertilizantes fosfatados utilizados foram o fosfato diamoniacal e o superfosfato triplo no plantio.

Nas áreas nunca cultivadas (NC), foram delimitados três transectos de amostragem, procedendo-se, depois, da mesma forma que nas subáreas cultivadas (C), e manteve-se uma distância máxima de 200 m entre as áreas C e NC.

Todas as amostras foram secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha, e armazenadas em caixas de papelão. A caracterização química e física dos materiais de solo encontra-se na Tabela 1. As análises químicas (pH em água, K, Ca, Mg, Al, H+Al, P e matéria orgânica) e físicas (granulometria) foram realizadas conforme Raij et al. (1987) e Embrapa (1997), respectivamente. Cu, Zn, Mn e Fe foram extraídos pelo DTPA (Lindsay & Norwell, 1978) e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, ao passo que B foi determinado pelo método da água quente (Jackson, 1970).

Na determinação das formas de P, utilizou-se o método de Hedley et al. (1982), com exceção do P-microbial que não foi determinado. Subamostras dos materiais de solo foram passadas em peneira de 100 meshes. As formas de P determinadas no solo foram: (1) formas lábeis de P, isto é, P disponível (P-resina) e o P adsorvido à superfície dos colóides $[(\text{Pi} + \text{Po}) - \text{NaHCO}_3 \text{ } 0,5 \text{ mol L}^{-1}]$; (2) formas pouco lábeis de P, que compreendem o P inorgânico ligado a Fe e a Al, e o P orgânico ligado a compostos húmicos $[(\text{Pi} + \text{Po}) - \text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}]$; e (3) formas não-lábeis de P, que incluem o P ligado a Ca (P-ác), extraído com HCl 1 mol L⁻¹, e as formas mais estáveis de Po e Pi (P-residual), determinadas por digestão com H₂SO₄ concentrado e H₂O₂. Após a extração do P-resina, o solo foi centrifugado a 2.000 rpm por 30 minutos, e uma parte da amostra foi utilizada para extração do Pi-bicarbonato e Pi+Po-bicarbonato por autoclave, enquanto o restante da amostra foi utilizado para a determinação das demais formas (Pi-hidróxido, Pi + Po-hidróxido, P-ácido e P-residual).

O P orgânico (Po) foi calculado por diferença entre o P-autoclavado e o P-acidificado, já que a amostra autoclavada inclui o P orgânico mais o inorgânico, enquan-

Tabela 1. Atributos químicos e físicos dos solos cultivados (C) em diferentes anos de plantio direto e da área adjacente nunca cultivada (NC)⁽¹⁾.

Atributo	Prof. (cm)	RQ		LVd		LVd		LVdf		LVdf	
		NC	C (1 PD)	NC	C (3 PD)	NC	C (5 PD)	NC	C (7 PD)	NC	C (11 PD)
pH em água	0-5	4,5	6,5	5,5	5,5	5,4	6,0	5,9	6,5	6,2	6,3
	5-10	4,6	6,7	5,7	5,4	5,3	5,5	6,2	5,6	6,2	6,6
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0-5	1,2	0,0	0,2	0,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5-10	1,0	0,0	0,6	0,1	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0-5	0,4	2,7	1,1	1,9	0,3	3,3	10,3	6,3	13,2	9,4
	5-10	0,3	2,3	0,4	1,5	0,4	1,9	5,3	4,1	9,4	7,9
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0-5	0,2	1,5	0,4	0,8	0,1	2,1	2,8	2,6	3,1	3,1
	5-10	0,1	1,4	0,2	0,8	0,1	1,3	1,1	1,2	3,7	1,8
K ⁺ (mg dm ⁻³)	0-5	31,5	125	104	146	32	214	180	286	179,5	213
	5-10	14,0	72	83	74	23	86	98,5	200	195,5	77
H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0-5	7,9	1,3	4,5	3,6	7,0	2,8	2,4	1,8	2,3	1,7
	5-10	7,1	1,5	4,5	3,4	5,6	4,3	3,1	4,1	5,7	2,1
P-Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	0-5	2,0	17,0	3,5	9,0	1,0	9,0	4,0	120,0	3,0	51,0
	5-10	1,0	34,0	2,0	9,0	1,0	10,0	2,0	19,5	2,0	13,0
P-resina (mg dm ⁻³)	0-5	6,9	19,2	8,5	15,5	6,9	15,0	14,4	145,5	12,8	67,8
	5-10	6,3	19,9	6,6	11,3	5,9	27,8	8,4	36,2	15,9	20,1
B (mg dm ⁻³)	0-5	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,5	0,4	0,6	0,5
	5-10	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
Cu (mg dm ⁻³)	0-5	0,2	0,6	0,3	1,4	0,2	1,3	4,0	1,6	3,2	3,1
	5-10	8,4	0,4	2,4	0,9	0,4	1,9	4,9	3,1	8,3	3,3
Fe (mg dm ⁻³)	0-5	147,7	11,7	31,7	26,5	108,5	26,4	5,2	4,6	11,7	9,4
	5-10	54,8	13,8	26,7	25,5	44,8	32,4	4,8	4,2	15,3	10,4
Mn (mg dm ⁻³)	0-5	2,7	3,3	7,7	4,2	3,6	4,6	26,1	12,7	74,3	32,9
	5-10	1,5	1,3	5,9	3,6	1,1	3,3	27,7	10,6	106,8	26,7
Zn (mg dm ⁻³)	0-5	0,5	2,2	0,2	3,5	0,1	2,6	3,7	2,5	1,2	1,2
	5-10	0,2	1,8	0,1	3,4	0,1	2,9	0,8	0,9	1,3	0,9
SB (cmol _c dm ⁻³)	0-5	0,7	4,5	1,77	3,07	0,48	5,95	13,56	9,63	16,76	13,04
	5-10	0,4	3,9	2,58	5,56	0,56	3,42	6,65	5,81	13,60	9,90
t (cmol _c dm ⁻³)	0-5	1,9	4,5	1,97	3,17	1,38	5,95	13,56	9,63	16,76	13,04
	5-10	1,4	3,9	3,18	5,56	1,36	3,52	6,75	5,81	13,70	9,9
T (cmol _c dm ⁻³)	0-5	9,8	5,8	6,27	6,67	7,48	8,75	16,0	11,43	19,06	14,74
	5-10	8,5	5,4	7,08	8,96	6,16	7,72	9,85	9,91	19,40	12,0
V (%)	0-5	7,1	77,6	28,2	46,0	6,4	68,0	85,0	84,3	87,9	88,5
	5-10	4,7	72,2	36,4	62,0	9,1	44,3	67,5	58,6	70,1	82,5
m (%)	0-5	63,2	0,0	10,2	3,2	65,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5-10	71,4	0,0	18,9	2,8	58,8	2,8	1,5	1,7	0,6	1,0
MO (g kg ⁻¹)	0-5	2,3	1,9	3,0	2,5	3,4	3,4	6,3	3,1	6,0	4,0
	5-10	1,9	1,9	1,9	2,2	2,2	2,4	3,1	2,5	5,3	2,9
Areia grossa (g kg ⁻¹)	0-5	36	25	586	604	500	363	101	179	158	136
	5-10	24	22	595	606	504	399	69	193	149	137
Areia fina (g kg ⁻¹)	0-5	832	826	131	144	209	229	84	180	116	124
	5-10	837	820	106	137	181	182	70	170	110	124
Silte (g kg ⁻¹)	0-5	27	52	87	57	72	145	237	248	204	244
	5-10	29	48	93	54	86	119	221	141	177	147
Argila (g kg ⁻¹)	0-5	105	97	196	195	219	263	578	393	522	496
	5-10	110	109	206	203	229	300	640	496	564	592

⁽¹⁾RQ: Neossolo Quartzarênico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférrico; NC: solo nunca cultivado; C: solo cultivado; Prof: profundidade; SB: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca de cátions efetiva; T: capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica; 1, 3, 5, 7 e 11 PD, respectivamente, 1, 3, 5, 7 e 11 anos de plantio direto.

to no extrato acidificado o P orgânico é separado mediante a precipitação da matéria orgânica.

Na extração do P-resina, foram confeccionados saquinhos de polietileno de 400 µm de malha, nos quais colocou-se 0,6 g de resina de troca aniônica DOWAX2-X18 saturada com bicarbonato.

O P foi determinado por colorimetria em todos os extratos, segundo Murphy & Riley (1962). As frações de P foram submetidas à análise de variância, utilizando-se o programa SISVAR, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Embora não tenha havido um desenho experimental clássico, com repetições e casualização de tratamentos (tempo de cultivo e classes de solo), as diferenças entre locais cultivados e nunca cultivados foram atribuídas ao tempo, ao sistema de cultivo, e às classes de solo. Esta é uma situação freqüentemente encontrada na literatura agrônô-

mica em comparações de locais cultivados com não-cultivados (Tiessen et al., 1983).

Resultados e Discussão

A distribuição das formas de P depende de várias propriedades do solo, entre as quais se destaca o pH. Lindsay & Moreno (1960) utilizaram diagramas de solubilidade de compostos fosfatados, em razão do pH para estudos da química de P no solo. De acordo com os diagramas, a solubilidade de P é controlada por fosfato de cálcio em pH acima de sete, e por fosfato de ferro e alumínio, em pH inferior a sete. Como esperado, o Pi-hid foi a maior fração de P-inorgânico (Tabela 2), representando a extração das formas secundárias de P associado com Fe e alumínio. Essa tendência de os solos apresentarem maiores concentrações de Pi-hid

Tabela 2. Formas de fósforo (mg kg⁻¹) em amostras de solos de áreas cultivadas sob plantio direto (PD) e de áreas adjacentes nunca cultivadas (NC), determinadas pelo fracionamento de Hedley et al. (1982)⁽¹⁾.

Prof. (cm)	Sistema de manejo	P-res	Pi-bic	Po-bic	Pi-hid	Po-hid	P-ác	Pt
Neossolo Quartzarênico (RQ)								
0-5	NC	3,6cD	1,7bE	1,7bE	6,5cC	26,9cB	1,8aE	493,2cA
0-5	C (1 ano PD)	17,9bD	7,8aE	1,7bG	22,6aC	65,4aB	3,7aF	889,4aA
5-10	NC	2,4cDE	0,6bE	6,0aC	4,3cCD	19,9dB	1,2aDE	496,6cA
5-10	C (1 ano PD)	21,7aC	3,4bE	1,9bE	13,3bD	48,8bB	2,5aE	865,8bA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)								
0-5	NC	2,2bD	0,9bE	3,4bcD	12,4cC	22,7bB	2,3bD	702,3dA
0-5	C (3 anos PD)	9,5aD	5,2aE	4,8bE	25,5aC	27,5aB	4,3abE	802,4bA
5-10	NC	1,4bD	0,3bE	1,8cD	5,2dC	16,6cB	2,1cD	711,1cA
5-10	C (3 anos PD)	8,1aD	5,1aE	8,3aD	23,2bC	26,7aB	5,7aE	824,4aA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)								
0-5	NC	2,5bF	5,7cE	9,0cD	32,5cC	35,2bB	4,6cE	1.036,2cA
0-5	C (5 anos PD)	12,1aD	12,0bD	10,6aE	68,1bB	49,8aC	9,9aE	1.248,8aA
5-10	NC	1,7cE	5,1cD	8,1dC	27,4dB	28,9dB	4,3cD	1.047,0bA
5-10	C (5 anos PD)	11,8aE	13,5aD	9,8bF	73,3aB	32,1cC	8,4bF	1.248,3aA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)								
0-5	NC	9,0cF	16,2bE	19,6aD	63,1bC	89,7aB	15,1bE	1.636,4bA
0-5	C (7 anos PD)	56,2aD	20,1aE	17,0aF	95,0aB	55,3bD	71,3aC	1.630,2cA
5-10	NC	11,0cF	16,0bE	21,6aD	61,6bC	82,7aB	18,7bE	1.661,1aA
5-10	C (7 anos PD)	18,8bC	5,2cE	11,8aD	61,0bB	64,1bB	21,3bC	1.499,9dA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)								
0-5	NC	9,8cF	16,6cE	22,4aD	34,5cC	94,7aB	22,5bD	1.418,6cA
0-5	C (11 anos PD)	39,7aE	26,5aF	20,2bG	125,7aB	61,0dC	43,3aD	1.755,8aA
5-10	NC	9,2cF	16,0cE	19,0cD	28,4dC	79,5bB	8,4dF	1.373,8dA
5-10	C (11 anos PD)	11,6bE	18,4bD	12,6dE	58,6bC	62,5cB	19,8cD	1.505,2bA

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, em um mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; NC: solo nunca cultivado; C: solo cultivado; P-res: P-resina; Pi-bic: Pi-bicarbonato; Po-bic: Po-bicarbonato; Pi-hid: Pi-hidróxido; Po-hid: Po-hidróxido; P-ác: P-ácido; Pt: P total.

é desvantajosa, do ponto de vista da eficiência de uso de fertilizantes, uma vez que esta fração mostra-se relativamente menos disponível do que P-res ou Pi-bic quando se compara o decréscimo, em cada fração, causado pela absorção pelas plantas (Araújo et al., 1993).

As concentrações das formas de P nas áreas estudadas (C e NC) variaram em profundidade, apresentando diferenças significativas, principalmente nas áreas cultivadas, nas quais o cultivo e a aplicação de fertilizantes e calcário afetaram sua distribuição, com aumento em quase todas as formas.

Em relação às formas de P numa mesma profundidade, não se verificaram diferenças significativas em algumas formas, principalmente nas mais lábeis

(P extraído pela resina, P-res; P extraído pelo bicarbonato, Pi-bic e Po-bic) (Tabela 2). As maiores concentrações de P foram observadas nas formas P-rdu (Tabela 3), seguidas de Pi-hid e Po-hid, e as menores, para P-res, Pi-bic, Po-bic e P-ác (Tabela 2).

De modo geral, os valores de P inorgânico (Pi) que representam o somatório das formas P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ác foram inferiores nas áreas não-cultivadas em relação às cultivadas, nas duas profundidades e nas três classes de solos estudadas. Os valores de Pi seguiram a seqüência LVdf>LVd>RQ (Tabela 3).

A participação do Po, obtida do somatório das formas Po-bic e Po-hid, aumentou com o tempo de cultivo em relação às classes de solo LVd e LVdf

Tabela 3. Fósforo inorgânico (Pi), fósforo orgânico (Po) e fósforo residual (P-rdu) em mg kg⁻¹ de solos de áreas cultivadas sob plantio direto (PD) e de áreas adjacentes nunca cultivadas (NC)⁽¹⁾.

Prof. (cm)	Sistema de manejo	Pi	Po	P-rdu
Neossolo Quartzarênico (RQ)				
0-5	NC	13,7 (2,77%)cC	28,5 (5,78%)cB	451,0 (91,45%)dA
0-5	C (1 ano PD)	52,1 (5,86%)aC	67,1 (7,72%)aB	770,3 (86,42%)bA
5-10	NC	8,5 (1,71%)dC	26,0 (5,23%)cB	462,2 (93,07%)cA
5-10	C (1 ano PD)	41,0 (4,72%)bC	50,7 (6,07%)bB	774,2 (89,21%)aA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)				
0-5	NC	17,8 (2,53%)bC	26,0 (3,71%)bB	658,4 (93,77%)dA
0-5	C (3 anos PD)	44,5 (5,49%)aB	34,3 (5,07%)aC	725,6 (89,44%)bA
5-10	NC	9,0 (1,27%)cC	18,4 (2,58%)cB	683,7 (96,15%)cA
5-10	C (3 anos PD)	42,1 (5,21%)aB	35,0 (2,39%)aC	747,3 (92,40%)aA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)				
0-5	NC	45,3 (4,37%)bB	44,2 (4,27%)bB	946,7 (91,36%)dA
0-5	C (5 anos PD)	102,2 (8,11%)aB	60,4 (5,63%)aC	1.086,3 (86,26%)bA
5-10	NC	38,5 (3,68%)cB	37,0 (3,53%)bB	971,5 (92,79%)cA
5-10	C (5 anos PD)	107,0 (8,49%)aB	41,8 (4,11%)bC	1.099,4 (87,40%)aA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)				
0-5	NC	103,4 (6,32%)bB	109,4 (6,68%)aB	1.423,7 (87,00%)bA
0-5	C (7 anos PD)	242,6 (15,61%)aB	72,4 (5,36%)bC	1.315,3 (79,03%)cA
5-10	NC	107,3 (6,45%)bB	104,4 (6,28%)aB	1.449,5 (87,26%)aA
5-10	C (7 anos PD)	106,4 (7,04%)bB	75,9 (5,80%)bC	1.317,7 (87,16%)cA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)				
0-5	NC	83,5 (5,79%)cC	117,1 (8,26%)aB	1.218,1 (85,86%)cA
0-5	C (11 anos PD)	235,3 (13,24%)aB	81,2 (5,72%)cC	1.439,4 (81,04%)aA
5-10	NC	61,9 (4,52%)dC	98,5 (7,17%)bB	1.213,3 (88,32%)dA
5-10	C (11 anos PD)	108,3 (7,14%)bB	75,0 (5,78%)dC	1.321,7 (87,08%)bA

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, em um mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; NC: solo nunca cultivado; C: solo cultivado; Pi: somatório das frações P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ác; Po: somatório das frações Po-bic e Po-hid; P-rdu: P-residual; número entre parênteses: porcentagem de Pi, Po e P-rdu em relação ao P total.

(Tabela 3), sugerindo que a menor dessorção de P da fase mineral, com aumento do intemperismo, é compensada pelo aumento da participação da fase orgânica no suprimento de P para as plantas.

Houve, em relação à todas as classes de solo, uma tendência de as formas Po e Pi decrescerem com a profundidade, fato este que pode ter sido causado pelas aplicações anuais de fertilizantes fosfatados na superfície do solo, pelo retorno do P absorvido pelas plantas para a superfície através da deposição dos resíduos vegetais sobre o solo e, ou, pela baixa mobilidade do P no solo.

Nas áreas cultivadas, houve predomínio do Pi em relação ao Po nas classes de solo LVd e LVdf (Tabela 3), em razão da aplicação da adubação

fosfatada e seu acúmulo naquela forma nesses solos mais argilosos (Tabela 1).

Formas inorgânicas de fósforo

O P inorgânico do solo inclui duas formas lábeis de P, P-res e Pi-bic, uma forma pouco lábil, Pi-hid, e uma forma não-lábil, P-ác. As formas P-resina (Raij, 1991) e Pi-bic (Tiessen et al., 1992; Rheinheimer et al., 2000) são consideradas disponíveis às plantas e representaram muito pouco do P total (Tabela 4).

De modo geral, tanto o P-res quanto Pi-bic apresentaram maiores valores, principalmente na profundidade de 0-5 cm, em todas as classes de solo. O Pi-bic foi mais elevado nos solos cultivados, em relação aos não-cultivados, o que indica a contribui-

Tabela 4. Fósforo inorgânico em mg kg⁻¹ de solos de áreas cultivadas sob plantio direto (PD) e de áreas adjacentes nunca cultivada (NC)⁽¹⁾.

Prof. (cm)	Sistema de manejo	P-res	Pi-bic	Pi-hid	P-ác
Neossolo Quartzarênico (RQ)					
0-5	NC	3,6 (0,72%)cAB	1,7 (0,35%)bB	6,5 (1,31%)cA	1,8 (0,37%)aB
0-5	C (1 ano PD)	17,9 (2,02%)bB	7,8 (0,88%)aC	22,6 (2,54%)aA	3,7 (0,42%)aD
5-10	NC	2,4 (0,47%)cAB	0,6 (0,11%)bB	4,3 (0,86%)cA	1,2 (0,24%)aAB
5-10	C (1 ano PD)	21,7 (2,50%)aA	3,4 (0,40%)bC	13,3 (1,53%)bB	2,5 (0,29%)aC
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)					
0-5	NC	2,2 (0,31%)bB	0,9 (0,13%)bC	12,4 (1,75%)cA	2,3 (0,33%)bcB
0-5	C (3 anos PD)	9,5 (1,17%)aB	5,2 (0,60%)aC	25,5 (3,14%)aA	4,3 (0,53%)abC
5-10	NC	1,4 (0,19%)bB	0,3 (0,04%)bB	5,2 (0,73%)dA	2,1 (0,29%)cB
5-10	C (3 anos PD)	8,1 (1,01%)aB	5,1 (0,64%)aC	23,2 (2,80%)bA	5,7 (0,70%)aC
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)					
0-5	NC	2,5 (0,24%)bC	5,7 (0,55%)cB	32,5 (3,11%)cA	4,6 (0,44%)cB
0-5	C (5 anos PD)	12,1 (0,96%)aB	12,0 (0,96%)bB	68,1 (5,41%)bA	9,9 (0,78%)aC
5-10	NC	1,7 (0,16%)cC	5,1 (0,48%)cB	27,4 (2,60%)dA	4,3 (0,41%)cB
5-10	C (5 anos PD)	11,8 (0,93%)aB	13,5 (1,07%)aB	73,3 (5,82%)aA	8,4 (0,67%)bC
Latossolo Vermelho distrófico (LVdf)					
0-5	NC	9,0 (0,55%)cC	16,2 (0,98%)aB	63,1 (3,81%)bA	15,1 (0,91%)bB
0-5	C (7 anos PD)	56,2 (4,40%)aC	20,1 (1,21%)aD	95,0 (5,71%)aA	71,3 (4,28%)aB
5-10	NC	11,0 (0,65%)cC	16,0 (0,95%)aB	61,6 (3,66%)bA	18,7 (1,11%)bB
5-10	C (7 anos PD)	18,8 (1,24%)bB	5,2 (0,35%)cC	61,0 (4,04%)bA	21,3 (1,41%)bB
Latossolo Vermelho distrófico (LVdf)					
0-5	NC	9,8 (0,68%)cD	16,6 (1,15%)cC	34,5 (2,04%)cA	22,5 (1,56%)bB
0-5	C (11 anos PD)	39,7 (2,23%)aC	26,5 (1,49%)aD	125,7 (7,08%)aA	43,3 (2,44%)aB
5-10	NC	9,2 (0,65%)cC	16,0 (1,15%)cB	28,4 (2,04%)dA	8,4 (0,60%)dC
5-10	C (11 anos PD)	11,6 (0,76%)bC	18,4 (1,21%)bB	58,6 (3,86%)bA	19,8 (1,31%)cB

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, em um mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; NC: solo nunca cultivado; C: solo cultivado; P-res: P-resina; Pi-bic: Pi-bicarbonato; Pi-hid: Pi-hidróxido; P-ác: P-ácido; número entre parênteses: porcentagem de P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ác em relação ao P total.

ção da adubação fosfatada durante o período de cultivo.

Entre todas as formas de Pi, o Pi-hid apresentou os maiores percentuais em relação ao P total (Tabela 4). O NaOH remove formas de P inorgânico consideradas como de baixa disponibilidade para as plantas (Roberts & Stewart, 1987), formas associadas a fosfatos amorfos e cristalinos de Fe e de Al (Williams et al., 1980). Entretanto, Tiessen et al. (1992) e Rheinheimer et al. (2000) observaram que, em solos tropicais, o Pi-hid é uma fração mais dinâmica do que geralmente tem sido relatado na literatura. O Pi-hid foi maior nos solos cultivados, o que reflete também o efeito da adubação fosfatada (Tabela 4). Ball-Coelho et al. (1993) e Rheinheimer & Anghinoni (2001) também constataram que áreas cultivadas que receberam fertilizações fosfatadas periódicas apresentaram maior acúmulo de P na fração Pi-hid.

A fração extraível por HCl (P-ác) apresentou valores maiores nas áreas cultivadas em relação às áreas nunca cultivadas. Essa fração consiste de formas de P ligadas ao Ca (Walker & Syers, 1976) e os resultados do presente trabalho podem estar relacionados com a maior quantidade de Ca introduzida pelas adições de calcário na superfície ao longo do período de cultivo.

Formas orgânicas de fósforo

As formas orgânicas de P incluem Po-bic e Po-hid. Os teores de Po-lábil (Po-bic) foram relativamente menores para todas as classes de solo em relação à forma Po-hid, com exceção do LVd (três anos de PD) (Tabela 5), o que está de acordo com observações de Tiessen et al. (1992) e Ball-Coelho et al. (1993). O Po-bic, a fração mais lábil entre as formas orgânicas, apresentou menor percentual de participação em relação ao P total (Tabela 5).

O Po-hid está associado a formas menos disponíveis de P e que envolvem transformações a longo prazo, conforme constataram Bowman & Cole (1978) em solos de regiões temperadas. Entretanto, os poucos trabalhos disponíveis em relação aos solos tropicais mostram que essa fração parece ser mais dinâmica do que o Po-bic (Tiessen et al., 1992; Motta, 1999).

O Po-hid apresentou maiores valores nas áreas C em relação às NC nos solos RQ e LVd. Por outro lado, nos solos LVdf os maiores valores de Po-hid

foram observados nas áreas NC, o que pode ser explicado pelos maiores teores de matéria orgânica, principalmente nas áreas não-cultivadas (Tabela 1).

Em relação ao tempo de cultivo, os solos LVd e LVdf apresentaram os maiores valores de Po na profundidade de 0-5 cm, possivelmente em decorrência do retorno dos resíduos vegetais ao solo, favorecido pelo sistema PD, o que também está de acordo com Cosgrove (1977).

Fração residual de fósforo

Essa forma representa o P ocluso, retido por minerais estruturalmente livres de P, como hematita, goethita e gibbsita (Smeck, 1985) e formas estáveis de P orgânico (Stewart et al., 1980). Essa forma foi inicialmente considerada relativamente estável. Entretanto, McLaughlin & Alston (1986) encontraram mudanças substanciais nessa forma com o tempo. O P-rdu é uma forma bastante significativa do P total nesses solos (Tabela 3). Em todas as classes de solo, o P-rdu foi superior à soma do P inorgânico (Σ Pi) e orgânico (Σ Po) extraídos pelo fracionamento seqüencial. No presente trabalho, podem estar incluídas no P-rdu formas mais resistentes de P primário que o HCl 1 mol L⁻¹ não conseguiu extrair. Trabalhos anteriores consideram P-apatita, envolvido por quartzo, incluído no P-rdu, o que o torna resistente à digestão prolongada com ácidos diluídos e ao ataque com ácidos fortes (Syers et al., 1968), além da possibilidade de aumento da fixação de P com o tempo. Portanto, o P-rdu pode conter tanto P secundário quanto P primário ocluso. Isso ajuda a explicar as altas proporções de P-rdu em todas as classes de solo, principalmente nos solos mais oxidícos (LVdf).

Fósforo total

De modo geral, houve uma tendência do teor de P total (Pt) decrescer com a profundidade em todas as classes de solo nas áreas cultivadas (Tabela 2). Por outro lado, nos solos não-cultivados os maiores valores de Pt foram encontrados na profundidade de 5-10 cm, o que provavelmente ocorreu por causa da diminuição do teor de matéria orgânica e ao seqüente aumento da fixação de P nesta profundidade (Silva et al., 1997).

O fato de as concentrações de Pt serem maiores nas áreas C do que nas NC, nas duas profundidades, indica que a fertilização fosfatada e a aplicação de

calcário, a qual afeta as formas Pi e Po adsorvidas (induzindo a liberação de P), são as causas dos acréscimos no teor de P total do solo, o que reflete aumentos no ciclo dos nutrientes.

Os valores mais baixos de P total no solo RQ indicam a baixa concentração de P no material de origem arenosa, enquanto os teores mais altos foram encontrados nos LVdf, refletindo a natureza da rocha de origem, o basalto (Resende et al., 1999).

Os valores de Pt foram maiores com o decorrer do tempo no sistema PD. Nessas condições, provavelmente ocorreu aumento do retorno dos nutrientes ao solo, favorecendo a atividade dos microrganismos e, conseqüentemente, a mineralização do Po. Resultados semelhantes foram constatados por Cosgrove (1977).

De modo geral, os solos de textura média e arenosa apresentaram maiores porcentuais de P nas formas pouco lábil (P-hid) e lábil (P-res e P-bic), comparativamente aos solos argilosos que apresentaram maiores porcentuais nas formas pouco lábil (P-hid) e não-lábil (P-ác). Esses resultados são importantes quanto ao manejo da adubação fosfatada nestes solos.

Do ponto de vista prático, os resultados demonstraram que o sistema PD proporciona melhores condições de disponibilidade do P, principalmente na forma Pi, em solos de textura argilosa. O PD tem sido caracterizado como um sistema conservacionista do ambiente, devido à maior cobertura da superfície do solo, ao acúmulo de resíduos vegetais (folhas, ra-

Tabela 5. Fósforo orgânico (Po) em mg kg⁻¹ de solos de áreas cultivadas sob plantio direto (PD) e de áreas adjacentes nunca cultivada (NC)⁽¹⁾.

Prof. (cm)	Sistema de manejo	Po-bic	Po-hid
Neossolo Quartzarênico (RQ)			
0-5	NC	1,7 (0,68%)bB	26,9 (5,43%)cA
0-5	C (1 ano PD)	1,7 (0,38%)bB	65,4 (7,37%)aA
5-10	NC	6,0 (2,38%)aB	19,9 (3,97%)dA
5-10	C (1 ano PD)	1,9 (0,44%)bB	48,8 (5,63%)bA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)			
0-5	NC	3,4 (0,94%)bcB	22,7 (3,21%)bA
0-5	C (3 anos PD)	4,8 (1,68%)bB	27,5 (3,39%)aA
5-10	NC	1,8 (0,50%)cB	16,6 (2,33%)cA
5-10	C (3 anos PD)	8,3 (2,06%)aB	26,7 (0,33%)aA
Latossolo Vermelho distrófico (LVd)			
0-5	NC	9,0 (1,72%)aB	35,2 (3,37%)bA
0-5	C (5 anos PD)	10,6 (1,68%)aB	49,8 (3,95%)aA
5-10	NC	8,1 (1,54%)bB	28,9 (2,74%)dA
5-10	C (5 anos PD)	9,8 (1,56%)aB	32,1 (2,55%)cA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)			
0-5	NC	19,6 (2,38%)aB	89,7 (5,42%)aA
0-5	C (7 anos PD)	17,0 (2,04%)aB	55,3 (3,32%)dA
5-10	NC	21,6 (2,58%)aB	82,7 (4,92%)bA
5-10	C (7 anos PD)	11,8 (1,56%)bB	64,1 (4,24%)cA
Latossolo Vermelho distroférico (LVdf)			
0-5	NC	22,4 (3,10%)aB	94,7 (6,57%)aA
0-5	C (11 anos PD)	20,2 (2,28%)bB	61,0 (3,44%)dA
5-10	NC	19,0 (2,72%)cB	79,5 (5,71%)bA
5-10	C (11 anos PD)	12,6 (1,66%)dB	62,5 (4,12%)cA

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas, em um mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; NC: solo nunca cultivado; C: solo cultivado; Po-bic: Po-bicarbonato; Po-hid: Po-hidróxido; número entre parênteses: porcentagem de Po-bic e Po-hid em relação ao P total.

mos e outros), à maior eficiência no uso de fertilizantes, à diminuição nas perdas por erosão e lixiviação, melhorando, conseqüentemente, as condições de fertilidade dos solos (Pöttker, 1998).

Conclusões

1. O método de extração seqüencial de P é eficiente na avaliação dos efeitos do sistema de manejo e do tempo de cultivo na dinâmica das transformações de P no solo.

2. O fracionamento propicia constatar que com o tempo de cultivo sob plantio direto, numa mesma classe de solo, as formas de P não-lábeis em relação ao P total tendem a diminuir, sendo acompanhadas por um aumento relativo das formas mais lábeis.

3. O teor de P total aumenta nas duas profundidades nos solos cultivados e nos solos nunca cultivados; os maiores valores são registrados na profundidade de 5-10 cm.

4. Os maiores acréscimos de P ocorrem em frações não monitoradas regularmente para fins de diagnóstico de fertilidade do solo.

5. O sistema plantio direto proporciona maior disponibilidade de fósforo.

Referências

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fertilização fosfatada anual em solos cultivados com cana-de-açúcar I: formas disponíveis e efeito residual do P. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 397-403, 1993.

BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I. H.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Short and long term phosphorus dynamic in a fertilized under sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 1027-1034, July/Aug. 1993.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 95-101, Jan. 1978.

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

COSGROVE, D. J. Microbial transformations in the phosphorus cycle. In: ALEXANDRE, M. (Ed.). **Advances in microbial ecology**. New York: Plenum, 1977. v. 1, p. 95-135.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI, 1999. 412 p.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; GHAUHAN, B. S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 4, p. 970-976, July/Aug. 1982.

JACKSON, M. L. **Análisis química de suelos**. 2. ed. Barcelona: Omega, 1970. 662 p.

LINDSAY, W. L.; MORENO, E. C. Phosphate phase equilibria in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 24, p. 177-182, 1960.

LINDSAY, W. L.; NORWELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 3, p. 421-428, May/June 1978.

MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L.; VIANNA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 331-336, set./dez. 1993.

McLAUGHLIN, M. L.; ALSTON, A. M. The relative contribution of plant residues and fertilizer to the phosphorus nutrition of wheat in a pasture/cereal system. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 24, p. 517-526, 1986.

MOTTA, P. E. F. **Fósforo em Latossolos com diferentes mineralogias, cultivados e não-cultivados: fracionamento, sorção e disponibilidade para soja e braquiária com e sem micorriza**. 1999. 158 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

MUZILLI, O. Fertilidade do solo em plantio direto. In: FACELLI, A. L.; TORRADO, P. V.; MACHADO, J. (Ed.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 147-160.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 95-102, 1983.

- PÖTTKER, D. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1998, Dourados. **Anais...** Dourados: Embrapa-CPAO, 1998. p. 37-42.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo**. São Paulo: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.
- RAMOS, M. A. **Sistemas de preparo mínimo do solo: técnicas e perspectivas para o Paraná**. Ponta Grossa: Embrapa-CNPSo, 1976. 23 p. (Comunicação Técnica, 1).
- RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 3. ed. Viçosa, MG: Núcleo de Estudo de Planejamento e Uso da Terra, 1999. 369 p.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 1, p. 150-160, jan. 2001.
- RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 345-354, 2000.
- ROBERTS, T. L.; STEWART, J. W. B. **Update of residual fertilizer phosphorus in western Canadian soils**. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1987. p. 1-15. (Publication, 523).
- SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, fev. 1999.
- SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; BLANCANEUX, P.; LIMA, J. M. de; CARVALHO, A. M. de. Rotação adubo verde-milho e adsorção de fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 6, p. 649-654, jun. 1997.
- SMECK, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 36, n. 2, p. 185-189, Nov. 1985.
- STEWART, J. W. B.; HEDLEY, M. J.; CHAUHAN, B. S. The immobilization, mineralization and redistribution of phosphorus in soils. In: WESTERN CANADA PHOSPHATE SYMPOSIUM, 1980, Edmonton. **Proceedings...** Edmonton: Alberta Soil Science Society, 1980. p. 276-306.
- SYERS, J. K.; WILLIAMS, J. D. H.; WALKER, T. W. The determination of total phosphorus in soils and parent materials. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 11, n. 1, p. 757-762, 1968.
- TIESSEN, H.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environments**, Amsterdam, v. 38, p. 139-159, 1992.
- TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; MOIR, J. O. Changes in organic and inorganic phosphorus of two grassland and their particle size fraction during 60-90 years of cultivation. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 34, p. 815-823, 1983.
- WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 1-19, Jan. 1976.
- WILLIAMS, J. D. H.; MAYER, T.; NRIAGU, J. O. Extractability of phosphorus minerals common in soils and sediments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 3, p. 462-465, May/June 1980.