

Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo

Phosphorus fractions as a function of the use of phosphate fertilizers in different soil classes

Lara Caroline Alves de Oliveira¹, Márcia de Almeida Carneiro², Felipe Adolfo Litter², Marco Antonio Camillo de Carvalho³, Oscar Mitsuo Yamashita³, Gustavo Caione³

RESUMO: A maioria dos solos brasileiros possui baixa fertilidade natural. A principal característica é a deficiência de fósforo (P) e alta capacidade de adsorção de P. Isso gera a necessidade de adicionar fertilizantes minerais fosfatados, orgânicos ou organomineral. Essa adição pode causar alterações na dinâmica do P no solo. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar as frações P no solo em função da aplicação de fertilizante orgânico, organomineral e fosfato mineral, em diferentes classes de solo. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x3. Os tratamentos consistiram de três fontes de P (fosfato mineral, orgânico e organomineral) em três classes de solo (LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, ARGISSOLO AMARELO Distrófico e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO), cultivados com *Glycine max* e depois com *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *ruziziensis*, nas mesmas unidades. Para o fracionamento de P, foi realizada uma coleta de todas as unidades experimentais aos 270 dias após a implantação do experimento. A adubação orgânica com fosfato aumentou o P total do solo, principalmente as formas não lábeis, enquanto a adubação mineral contribuiu para incrementos nas frações lábeis de P nos solos. Em solos arenosos, os níveis lábeis de P são maiores.

Palavras-chave: Adsorção de fósforo. Fertilizantes orgânicos. Fracionamento de fósforo.

ABSTRACT: Most Brazilian soils have low natural fertility. The main characteristic is phosphorus (P) deficiency and high P adsorption capacity. This creates the need to add phosphate mineral fertilizers, organic or organomineral. This addition can cause changes in P dynamics in the soil. Thus, the aim of this study was to evaluate the P fractions in the soil as a function of the application of organic fertilizer, organomineral and mineral phosphate, in different soil classes. The experimental design used was entirely randomized, in a 3x3 factorial scheme. The treatments consisted of three P sources (mineral, organic and organomineral phosphate) in three soil classes (RED LATOSOL Dystrophic, YELLOW ARGISOL Dystrophic and QUARTZARENIC NEOSOLS), cultivated with *Glycine max* and then with *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *ruziziensis*, in the same units. For the fractionation of P, a collection of all experimental units was performed 270 days after the implementation of the experiment. The organic fertilization with phosphate increased the total P of the soil, mainly the non-labile forms, while the mineral fertilization contributed to increases in the labile fractions of P in the soils. In sandy soils, labile P levels are higher.

Keywords: Organic fertilizers. Phosphorus adsorption. Phosphorus fractionation.

Autor correspondente:

Lara Caroline Alves de Oliveira: lara.alvesoliveira@botmail.com

Recebido em: 28/06/2020

Aceito em: 26/11/2020

INTRODUÇÃO

A maioria dos solos brasileiros possui baixa fertilidade natural, caracterizada principalmente pela deficiência de fósforo (P). Essa condição gera a necessidade de aplicar grandes quantidades de fertilizantes fosfatados para obter altos rendimentos das culturas. O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes para o crescimento das plantas em muitos solos, em ambientes tropicais e subtropicais. Isso se deve principalmente à alta adsorção de íons fosfato pelos óxidos e hidróxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe), abundantes em solos altamente intemperizados (SILVA *et al.*, 2018).

O suprimento de P é geralmente realizado pela aplicação de fontes solúveis de rochas fosfáticas. No entanto, este é um recurso finito, que traz consigo a preocupação com a escassez em um futuro muito próximo.

A maior parte do P aplicado ao solo, proveniente de fertilizantes de rápida solubilidade, é retido em partículas minerais de argila e compostos orgânicos. Isso resulta na formação de frações de P no solo que dificilmente estão

¹ Doutoranda em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Jaboticabal (SP), Brasil.

² Mestrado em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos (PPGBIOAGRO) da Universidade do Estado do Mato Grosso (UNEMAT), Alta Floresta (MT), Brasil.

³ Docente permanente do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos (PPGBIOAGRO) da Universidade do Estado do Mato Grosso (UNEMAT), Alta Floresta (MT), Brasil.

disponíveis para as plantas. Assim, a busca por novas fontes de P que possam promover a manutenção da capacidade produtiva dos solos tornou-se muito importante (DAMACENO *et al.*, 2019).

Chama a atenção a aplicação de fertilizantes orgânicos como fonte de P, devido ao baixo custo e à liberação gradual de nutrientes no solo (BOEN; HARALDSEN, 2013). Esses fosfatos incluem farinha de osso bovino calcinada e lixo de aves. Essas fontes proporcionaram aumentos na produção de soja e gramíneas, além de aumento significativo nos níveis de Ca, Mg e P no solo. Além disso, eles podem potencialmente alterar a dinâmica do P no solo, para aumentar a disponibilidade para as plantas (BOITT *et al.*, 2018; DAMACENO *et al.*, 2018).

Para a compreensão do comportamento das formas de P do solo, o fracionamento é uma técnica que permite identificar a dinâmica das transformações desse elemento no solo, dependendo do manejo, classes de solos e adubação adotada. O método é utilizado porque acredita-se que os fertilizantes fosfatados em contato com o solo por longos períodos sofrem modificações, nas quais diferentes frações residuais são acumuladas no solo com diferentes graus de energia de ligação (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982; PAVINATO *et al.*, 2009 e TOKURA *et al.*, 2011). Evidências mostram que há efeito sinérgico quando a aplicação de fertilizantes fosfatados está associada à adição de algum composto orgânico, aumentando a concentração de fósforo disponível no solo, que podem relacionar as formas de P no solo à sua disponibilidade para plantas e diminua a dose de fertilizante mineral (GATIBONI *et al.*, 2007).

O objetivo deste estudo foi avaliar as frações de P no solo, sob a influência da aplicação de fertilizantes fosfatados orgânico, mineral e organomineral, em diferentes classes de solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, na região de Alta Floresta - MT, Brasil.

Os solos utilizados foram classificados como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, ARGISSOLO AMARELO Distrófico e NEOSSOLO QUARTZARÊNICO seguindo a metodologia descrita por Santos *et al.* (2018). As análises químicas e granulométricas dos solos foram realizadas antes da instalação do experimento, seguindo a metodologia da Embrapa (2009), cujo resultados são mostrados na Tabela 1.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 3x3, composto por três fontes de P e três classes de solo, com quatro repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Essas unidades foram compostas por vasos plásticos, com capacidade para 20 dm³ de solo, preenchidos com solo e fertilizantes de acordo com cada tratamento.

Tabela 1. Análise química e granulométrica dos solos. Profundidade: 0,0-0,40 m

Classes	Prof. (m)	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	P mg dm ³	K	Ca	Mg	H+Al
						-----cmol _c dm ³ -----		
LVd	0-0,40	5,2	4,8	0,7	0,20	2,40	1,02	3,70
RQ	0-0,40	5,1	4,2	0,7	0,08	0,27	0,15	2,63
PAd	0-0,40	4,9	4,2	0,7	0,06	0,85	0,44	3,15
Classes	Prof. (cm)	T cmol _c dm ³	SB	V %	m	Arcia	Silte	Argila
						-----g kg ⁻¹ -----		
LVd	0-0,40	7,3	3,6	49,4	0,0	480	51	469
RQ	0-0,40	3,1	0,5	16,0	41,7	655	76	269
PAd	0-0,40	4,5	1,3	30,0	23,4	630	26	344

Nota: T= CTC a pH 7; SB= Soma das bases; V= Saturação de base e m= Saturação do alumínio. LVd= LATOSSOLO VERMELHO Distrófico; PAd= ARGISSOLO AMARELO Distrófico; RQ = NEOSSOLO QUARTZARÊNICO.

As fontes de P utilizadas foram: fosfato monoamônico (51% do total de P_2O_5); fertilizante orgânico constituído por farinha de osso bovino calcinada + cama de aves moídas (20% do total de P_2O_5 - base seca); e fosfato monoamônico + fertilizante orgânico (51% e 20% do total de P_2O_5 , respectivamente). Todas as fontes foram aplicadas na dose de 170 kg ha^{-1} de P_2O_5 total, com a homogeneização destas com o solo, com a ajuda de um misturador de concreto. Todos os tratamentos foram balanceados com N e K, com o objetivo de proporcionar as mesmas condições para todos os vasos.

Para correção da acidez do solo, foi aplicado calcário (PRNT = 85%) mantendo-se incubado por 60 dias, com o objetivo de aumentar a saturação por bases (V%) para 60%, conforme indicado por Sousa e Lobato (2004).

Inicialmente, a soja (*Glycine max*) foi semeada nas unidades experimentais e, após o cultivo da soja (120 dias após a semeadura - DAS), o capim *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *ruzizensis* foi semeado nos mesmos vasos, sem perturbação do solo.

No 270 DAS, ou seja, após o cultivo de soja e *U. ruzizensis*, foi realizada a análise destrutiva do experimento, em que o solo foi novamente homogeneizado com a ajuda de um misturador de concreto, coletando uma amostra de solo de cada vaso, visando a determinação das frações de P nos solos. Inicialmente, as amostras coletadas foram secas em estufa a 50°C até peso constante e peneiradas a $<2\text{mm}$. As frações P dos solos foram avaliadas seguindo o método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações subsequentes de Condrón, Goh e Newman (1985).

Posteriormente, pesaram-se 0,5 g de amostras de solo, que foram submetidas a diferentes soluções de extração em ordem sequencial, que são:

- a) resina permutadora de ânions - RTA (lâmina RTA imersa em 10 mL de H_2O em contato direto com o solo), 1027
extraíndo PRTA (inorgânico);
- b) 10 mL de $NaHCO_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, extraíndo Pi_{Bic} e Po_{Bic} (fósforo inorgânico e orgânico lábeis, extraído com bicarbonato de sódio a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$);
- c) 10 mL de $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, extraíndo $Pi_{Hid-0,1}$ e $Po_{Hid-0,1}$ (fósforo inorgânico e orgânico moderadamente lábeis, extraído com hidróxido de sódio a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$);
- d) 10 mL de $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ de HCl , extraíndo P_{HCl} (fósforo inorgânico moderadamente lábil ligado ao cálcio, extraído com ácido clorídrico a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$);
- e) 10 mL de $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, extraíndo $P_{Hid-0,5}$ (fósforo inorgânico e orgânico não lábeis extraído com hidróxido de sódio a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$).

O solo residual no tubo foi submetido à digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2$ para obter P residual (PResidual). O fósforo dos extratos ácidos, além das digestões totais (B, C e E), foram quantificados seguindo a metodologia de Murphy e Riley (1962). Para extratos alcalinos (B, C e E), a determinação do P inorgânico foi feita de acordo com Dick e Tabatabai (1977).

As frações de P foram agrupadas de acordo com sua labilidade (CROSS; SCHLESINGER, 1995): P lábil (Pi_{RTA} , Pi_{Bic} e Po_{Bic}), P moderadamente lábil ($Pi_{NaOH-0,1}$, $Po_{NaOH-0,1}$ e Pi_{HCl}) e P não lábil ($Pi_{NaOH-0,5}$, $Po_{NaOH-0,5}$ e $Pi_{Residual}$). O fósforo total resultou da soma de todas as frações extraídas anteriormente.

Os dados de todas as avaliações foram submetidos à análise de variância e as médias obtidas sob a influência da aplicação de fontes de fósforo e classes de solo, comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, realizado com o auxílio do programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019). Para fósforo solúvel e fracionamento de P, as análises foram realizadas no software BioEstat (versão 5.2) e o nível de significância foi estabelecido em $p < 0,05$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados, observa-se, para as doses de P, que houve resposta significativa em todas as frações, exceto no P_{Residual} . Para classes de solo, todas as frações responderam significativamente. Os resultados indicam que houve interação ($p < 0,05$) entre as classes de solo e as fontes de P para Pi_{BIC} , Po_{BIC} e Pi_{HCl} (Tabela 2).

A primeira fração é extraída por resina de troca aniônica (RTA) e é considerada lábil, ou seja, prontamente disponível para as plantas. Observou-se no experimento que houve uma resposta significativa às fontes e classes de solo. Quanto às fontes, o fertilizante mineral MAP proporcionou os maiores níveis de P inorgânico lábil, com 64% e 29% a mais do que o fertilizante orgânico e organomineral, respectivamente. Isso indica que fontes pouco solúveis exigem períodos mais longos para serem prontamente disponíveis para as plantas.

Para as classes de solo, a maior quantidade de P lábil foi observada no RQ, sendo estatisticamente superior ao Lvd e PAd, sugerindo que esses resultados são coerentes com os maiores teores de argila e a presença de óxidos de Fe e Al no Lvd e PAd em relação ao RQ. Resultados semelhantes foram relatados por Novais e Smyth (1999), que indicam que esses são fatores do solo que podem influenciar a adsorção de fósforo no solo.

Tabela 2. Valores de F, coeficiente de variação (CV) e valores médios das frações P do fracionamento de Hedley resultantes do cultivo de soja e *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *ruziziensis* em diferentes classes de solo e fertilizantes fosfatados. Alta Floresta, 2020

	Pi_{RTA}	Pi_{BIC}	Po_{BIC}	$Pi_{\text{HID-0,1}}$	$Po_{\text{HID-0,1}}$	Pi_{HCl}	$Pi_{\text{HID-0,5}}$	$Po_{\text{HID-0,5}}$	P_{residual}	P_{total}
	----- (mg kg ⁻¹) -----									
Fontes de P (F)										
Mineral	2,90 a	1,88	54,22	38,19 b	229,30 a	2,36	33,22 b	125,71 b	22,63	716,36 b
Orgânica	1,77 c	1,13	48,95	36,70 b	194,69 b	5,05	42,52 a	188,16 a	226,12	770,20 a
Organomineral	2,24 b	1,36	44,62	44,39 a	185,83 b	3,06	41,02 a	116,51 b	229,50	676,60 b
Valores de F	21,61**	26,16**	6,71**	12,75**	4,95*	32,36**	13,39**	19,99**	0,18 ns	6,38**
Classes de solo (C)										
Lvd	2,04 b	1,35	54,27	56,45 a	310,81 a	2,66	43,45 a	235,70 a	303,24 a	1015,65 a
PAd	2,15 b	1,51	42,91	33,53 b	156,84 b	3,43	35,24 b	149,57 b	276,33 b	724,21 b
RQ	2,52 a	1,51	50,61	29,30 c	142,68 b	4,37	28,07 b	45,12 c	98,68 c	423,32 c
Valores de F	3,76*	1,68*	9,77**	163,66**	81,08**	12,28**	47,85**	119,84**	195,50**	253,79**
Interação F x C										
Valores de F	1,60 ns	4,20**	8,17**	1,41 ns	1,93 ns	13,69**	1,97 ns	1,53 ns	0,74 ns	0,83 ns
CV (%)	19,16	17,68	13,04	9,95	17,59	24,28	12,15	21,05	12,18	8,93

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre os testes de Scott-Knott no nível de 5%. ns, **, * Não significativo, significativo a 1% e significativo a 5% de probabilidade. Lvd = LATOS-SOLO VERMELHO Distrófico; PAd = ARGISSOLO AMARELO Distrófico; RQ = NEOSSOLO QUARTZARÊNICO. Pi_{RTA} = Fósforo lábil extraído com resina trocadora de ânions; Pi_{BIC} = Fósforo inorgânico lábil extraído com bicarbonato de sódio; Po_{BIC} = Fósforo orgânico lábil extraído com bicarbonato de sódio; $Pi_{\text{HID-0,1}}$ = Fósforo inorgânico moderadamente lábil extraído com hidróxido de sódio a 0,1Mol; $Po_{\text{HID-0,1}}$ = Fósforo orgânico moderadamente lábil extraído com hidróxido de sódio a 0,1Mol; Pi_{HCl} = Fósforo inorgânico moderadamente lábil extraído com ácido clorídrico; $Pi_{\text{HID-0,5}}$ = Fósforo inorgânico não lábil extraído com hidróxido de sódio a 0,5Mol; $Po_{\text{HID-0,5}}$ = Fósforo orgânico não lábil extraído com hidróxido de sódio a 0,5Mol.

Quanto ao P inorgânico (Figura 1-A), verificou-se que o fertilizante mineral proporcionou os maiores níveis de P inorgânico lábil em todas as classes de solo. Somente no LVd não houve diferença entre fertilização mineral e organomineral. Analisando o efeito de cada fonte de P nas classes de solo, o fertilizante orgânico apresentou diferença estatística, com maiores níveis de Pi lábil no RQ, com aumento de 58% em relação ao LVd e PAd.

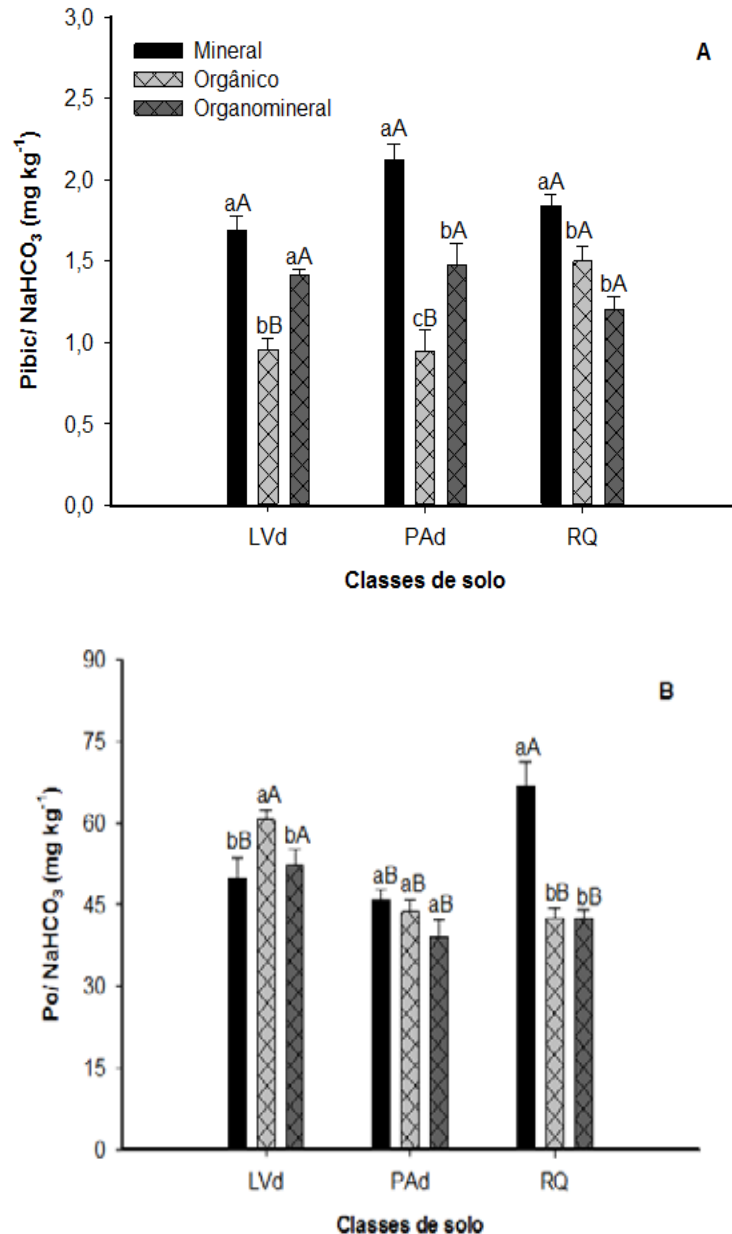


Figura 1. Desdobramento da interação entre classes e fontes de Pi e Po lábil extraídos por bicarbonato. As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam as fontes de P na mesma condição do solo, enquanto letras maiúsculas comparam o efeito de cada fonte de P em diferentes solos. As barras ativadas representam o erro padrão da média ($n = 4$).

Os resultados do presente estudo corroboram com os observados por Olibone e Rosolem (2010), uma vez que a aplicação de fertilizantes fosfatados promoveu alterações na fração lábil do P inorgânico com o uso de fontes solúveis. De acordo com Dobermann, George e Thevs (2002), a fertilização com fosfato é responsável pela mudança no Pi_{bic} , na qual as fontes solúveis tendem a aumentar os teores de P no solo rapidamente, quando comparado às fontes naturais, como observado no presente estudo.

Independentemente da classe do solo ou da fonte de P, verificaram-se baixas concentrações de frações inorgânicas lábeis. Isso prova a dificuldade de manter o conteúdo prontamente disponível para as plantas, pois essa fração representa Pi pouco adsorvido pela matriz mineral do solo.

Para o P orgânico (Figura 1-B), observou-se que o fertilizante orgânico e o organomineral proporcionaram maiores níveis de fósforo orgânico lábil no Lvd, sendo significativamente maior que o PAd e o RQ. Em relação aos fertilizantes minerais, foram observados maiores teores de Po_{BIC} no RQ, diferindo do Lvd e PAd com 33% e 45% de superioridade, respectivamente. No PAd, independentemente da fonte aplicada, não houve diferença.

A predominância de Po sobre Pi, encontrada neste estudo, corrobora com Duda *et al.* (2013) e Partelli (2009), que trabalharam com classes de solo como, Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho, entre outros. Esses autores descobriram que essa fração representava 20 a 80% de todo o fósforo no solo e que esse pode estar prontamente disponível para as plantas após o processo de mineralização. Esta situação ocorre principalmente sob condições climáticas em solos tropicais e subtropicais e devido à atividade microbiana do solo (GATIBONI; KAMINSKI; SANTOS, 2005).

De acordo com Rheinheimer e Anghinoni (2001), formas orgânicas de P no solo dependem de reações biológicas, em que, a presença de resíduos nas camadas superficiais do solo pode favorecer a rápida transformação de P inorgânico em P orgânico lábil. Desta maneira, como no presente estudo, a *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *ruziziensis* foi inserida após o cultivo da soja, sem o revolvimento do solo, os resíduos vegetais advindos da soja permaneceram no solo durante todo o ciclo das culturas. As frações de Po_{BIC} , observadas no estudo, podem ser atribuídas à maior atividade biológica e, conseqüentemente, maior decomposição dos resíduos presentes no solo, responsável pela formação de compostos orgânicos de fosfato a partir do P inorgânico (BUNEMANN *et al.*, 2008).

1030

De acordo com os relatos de Sharpley e Sisak (1997), a aplicação de esterco aumentou a atividade microbiana e sequestrou inicialmente o P para essa fração (Po_{BIC}), mas após um período de tempo o P foi disponibilizado às plantas por sua mineralização.

Os resultados do $Pi_{HID-0,1}$ moderadamente lábil (Tabela 2), que compreende P ligado aos óxidos de Fe e Al, indicam aumento no teor de fósforo inorgânico com a aplicação de fertilizante organomineral, com porcentagens de 21% e 16% maior em orgânicos e minerais fertilizantes. Isso indica que, com a aplicação do fertilizante orgânico MAP + composto de osso calcinado e cama de aviário, possivelmente houve equilíbrio na adsorção de P entre as fontes solúveis e pouco solúveis utilizadas. Quanto às classes de solo, verificou-se que no Lvd os níveis de Pi eram moderadamente lábeis, e 68% e 93% maiores que o PAd e RQ, respectivamente.

Comparando as frações Pi_{BIC} com as frações $Pi_{HID-0,1}$ (Tabela 2), observou-se que $Pi_{HID-0,1}$ representou a maior proporção de P, indicando que grande parte do P aplicado ao solo foi rapidamente adsorvido, com pouca disponibilidade na solução do solo. Tokura *et al.* (2011) relataram que o conteúdo dessa fração era maior no Latossolo, quando comparado ao Neossolo, justificando que níveis mais altos de Fe e ligações alteradas com a fração coloidal, apresentam alta capacidade de imobilização do P.

Tokura *et al.* (2011) também encontraram níveis mais altos dessa fração do que da fração lábil do Pi. Esses autores sugerem que a fração $Pi_{HID-0,1}$ é o principal amortecedor para as frações mais lábeis do solo. Dessa maneira, como as formas mais lábeis são consumidas por plantas e micro-organismos, uma parte da fração Pi moderadamente lábil oculta é convertida em Pi_{BIC} , continuando a tamponar o sistema de disponibilidade de fósforo para plantas. Com o tempo, formas mais estáveis de P são formadas, aumentando o pool de P não lábil (RAIJ, 1991).

O fósforo orgânico moderadamente lábil ($Po_{HID-0,1}$) foi influenciado pelas fontes de P (Tabela 2) em que, a partir da aplicação do fertilizante mineral, os níveis de $Po_{HID-0,1}$ foram maiores quando comparados com as fontes orgânica e organomineral. Ainda, para a mesma fração ($Po_{HID-0,1}$), as classes de solo também a influenciaram, em que o Lvd

apresentou os maiores níveis de P, sendo estatisticamente superior ao PAd e RQ, em 98% e 118%, respectivamente. Se compararmos as frações Po_{BIC} com as frações $Po_{HID-0,1}$, observa-se que $Po_{HID-0,1}$ representou a maior proporção de P. De acordo com Novais e Smyth (1999), é comum em solos muito intemperizados, como o Latossolo, o Po predomina na forma orgânica estabilizada quimicamente e fisicamente, resultando em baixos níveis de P na solução do solo.

Diante desses fatos, pode-se dizer que a fração de P com menor estado de labilidade é uma fonte importante para a manutenção da planta, atuando tanto como fonte quanto como dreno da solução do solo (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982), dependendo da sua composição mineralógica, manejo do solo e fertilização, entre outros fatores (CALEGARI *et al.*, 2013). Além disso, muitos estudos relatam que a passagem dessas formas de P, orgânicas e inorgânicas, para frações mais lábeis do solo é frequentemente mediada pela atividade de micro-organismos do solo (MOHAPATRA *et al.*, 2013).

Na Figura 2 pode-se observar que, em todas as classes de solo, o fertilizante orgânico proporcionou níveis mais altos de P inorgânico moderadamente lábil. Porém, apenas no LVd, fertilizantes minerais e orgânicos não diferiram entre si. Quanto às classes de solo, os maiores teores de P inorgânico moderadamente lábil foram obtidos no RQ, que não diferiram do organomineral no PAd.

A fração de P extraído com HCl representa o Pi adsorvido com maior energia nas superfícies dos minerais e a fração de Pi ligada ao cálcio, formando fosfato de cálcio altamente estável (CROSS; SCHLESINGER, 1995; DAMACENO *et al.*, 2019) Isso pode advir dos minerais primários do solo, fosfatos de cálcio e também da adição de fertilizantes fosfatados sem solubilização prévia.

Nesta pesquisa, foi utilizado adubo orgânico composto de canteiro de galinha e farelo de osso calcinado. A farinha de osso calcinada possui altos níveis de cálcio, resultantes da queima dos ossos. Assim, o suprimento de Ca pode ter favorecido a ligação Ca-P e ocasionado níveis mais altos de Pi moderadamente lábil nessa fração, com a aplicação de fertilizante orgânico. Caione, Fernandes e Lange (2013), ao trabalhar com a aplicação de farinha de ossos no cultivo de cana-de-açúcar, observaram níveis mais elevados de Ca no solo, reforçando os resultados obtidos neste estudo.

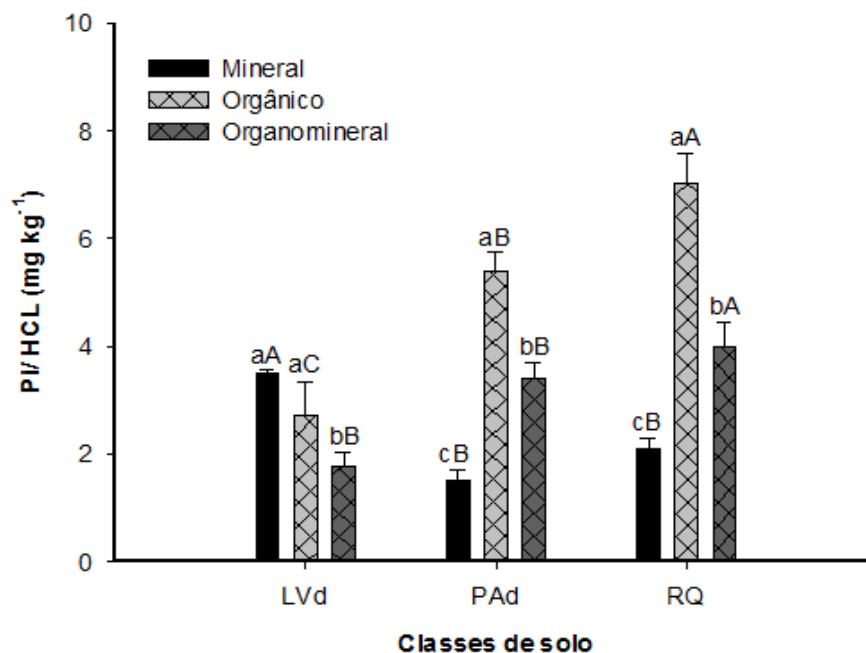


Figura 2. Desdobramento da interação entre classes e fontes para Pi moderadamente lábil extraído por ácido clorídrico. As médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam as fontes de P na mesma condição do solo, enquanto letras maiúsculas comparam o efeito de cada fonte de P em diferentes solos. As barras ativadas representam o erro padrão da média ($n = 4$).

Quanto às frações não lábeis de Pi e Po (Tabela 2), observou-se que para a fração não lábil de Pi, os níveis foram maiores com a aplicação de fertilizante orgânico e organomineral. Para classes de solo, Lvd apresentou os níveis mais altos de P inorgânico não lábil, em que RQ apresentou os níveis mais baixos, mostrando a maior adsorção de P em Lvd.

A fração Pi, extraída com hidróxido de sódio a 0,5 mol L⁻¹, é considerada a fração que é quimicamente ou fisicamente protegida por microagregados no solo, tendo praticamente nenhuma reversibilidade no solo. No presente estudo, de maneira geral, observou-se que a Lvd tem tendência a acumular P em formas não lábeis quando submetida à adubação com fertilizantes de baixa solubilidade e mesmo com fertilizantes solúveis. Tais características são difundidas no estudo da dinâmica de P em solos intemperizados, com as maiores proporções de P em solos ocorrendo em formas não lábeis (NOVAIS; SMITH, 1999).

Quanto ao P orgânico não lábil, a aplicação de fertilizante orgânico proporcionou níveis mais altos para essa fração, é significativamente maior que a fonte mineral e organomineral. Nesta fração, em relação às classes de solos, foram obtidos maiores teores de $P_{\text{HID-0,5}}$ no Lvd, sendo superiores às demais classes de solos, sendo observados no RQ os menores valores para essa fração.

Os maiores valores observados de Po não lábil com a aplicação de fertilizante orgânico, provavelmente está relacionado ao poder de solubilidade deste fertilizante, que apresenta baixa solubilidade em água e não são imediatamente disponibilizados e aproveitáveis pelas plantas, em que, para que a disponibilização ocorra, é necessária a acidificação do fósforo presente. No entanto, de acordo com Kozen e Alvarenga (2010), quando o P encontra-se nesta fração é difícil disponibilizar P na solução do solo.

1032

Segundo Giaveno *et al.* (2010), com a aplicação de fontes orgânicas de P, há predominância de formas não lábeis de Po no solo. Isso se deve à maior formação de fosfatos monoéster (fosfato de inositol), que são as formas mais abundantes de P orgânico e possuem ligações de alta energia. O que aumenta a capacidade de interagir com a fração inorgânica do solo tornando-o improvável de ser mineralizado. Assim, segundo os mesmos autores, a estabilidade desses compostos depende de sua origem e interação com a fração mineral, uma vez que são utilizados pelos micro-organismos como importantes fontes de carbono e elétrons.

Quanto ao maior P não lábil no Lvd, Villani *et al.* (1993) descrevem que nos solos mais argilosos há forte predomínio do dreno-solo sobre o dreno-planta pelo que se adiciona como fertilizante, enquanto nos solos mais arenosos o dreno-planta é predominante, e a formação de formas não lábeis de P são significativamente menores, e isso resultaria no maior potencial produtivo dos solos arenosos.

Quanto às frações P_{residual} , verificou-se que não houve resposta para as fontes de P, indicando que fontes solúveis e pouco solúveis não alteram essa fração. Em relação às classes de solo, o Lvd apresentou os maiores níveis de P_{residual} . Segundo Rodrigues *et al.* (2016), esse resultado é esperado em solos ácidos e ricos em óxido de Fe e Al, uma vez que esses solos têm alto teor de minerais adsorventes fortes de P, como hematita, goethita e gibbsite. Isso resulta na redução da recuperação de P dos fertilizantes pelas lavouras, gerando a necessidade de fertilização frequente de P para manter a produção agrícola.

Para os níveis de P_{total} , resultantes da soma de todas as frações de P, houve diferença estatística para fontes de P e classes de solo (Tabela 2). O maior conteúdo foi encontrado na aplicação de fertilizante orgânico, sendo superior aos fertilizantes organomineral e mineral. Quanto às classes de solo, o maior conteúdo de P_{total} foi obtido em Lvd, que foi 140% e 40% superior ao RQ e PAd, respectivamente.

A média mais alta obtida para P_{total} com adubação orgânica indica que a eficiência agrônômica dos fertilizantes naturais de fosfato pode ser suficientemente alta para obter resultados compatíveis com a aplicação de fosfatos solúveis (CHIEN *et al.*, 2011), sendo adequados para uso em culturas de ciclo sequenciais ou mais longas. Calegari *et*

al. (2013) demonstraram que, após 154 meses, o teor de P disponível no solo e a produção anual de forragem foram equivalentes à aplicação de hiperfosfato de Gafsa e fosfatos solúveis.

Conforme observado no presente estudo, o IVD apresentou o maior conteúdo de P_{total} e o RQ, o menor. Isso ocorreu devido ao menor acúmulo de resíduos existentes no RQ, porque em solos arenosos a mineralização de P é muito mais acentuada do que em solos argilosos. Além disso, há menor teor de P no material de origem do solo, uma vez que o quartzo é o mineral primário predominante (RODRIGUES *et al.*, 2016). Essa situação difere dos solos argilosos que apresentam maior teor de argila e óxidos (hematita e goethita), com maior afinidade pela adsorção de P, com menor acúmulo em frações mais lábeis e menor uso pelas culturas (JACOMINE; ALMEIDA; MEDEIROS, 1973).

Segundo Rodrigues *et al.* (2016), independentemente da natureza química, o fósforo pode ser dividido de acordo com a facilidade com que é restaurado na solução do solo. A divisão em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis ajuda a entender a dinâmica do P no solo de acordo com os diferentes tipos de solos, condições ambientais e fontes de fertilizantes utilizadas.

4 CONCLUSÕES

A aplicação do fertilizante mineral proporciona maiores formas de fósforo lábil no solo, enquanto a adubação com fertilizante orgânico aumenta o teor de fósforo total do solo, principalmente em formas não lábeis, ficando pouco disponível para as plantas.

A classe de solo IVD apresenta maiores níveis de fósforo total fortemente adsorvido no solo, indicando a baixa disponibilidade de P ao longo do tempo, enquanto no RQ maiores são as formas de fósforo lábeis, rapidamente disponibilizadas e aproveitadas pelas plantas.

1033

REFERÊNCIAS

- BOEN, A.; HARALDSEN, T. K. Meat and bone meal and biosolids as slow-release phosphorus fertilizers. **Agricultural and Food Science**, v. 22, n. 2, p. 235-246, 2013.
- BOITT, G.; SCHMITT, D. E.; GATIBONI, L. C.; WAKELIN, S. A.; BLACK, A.; SACOMORI, W.; CASSOL, P. C.; CONDRON, L. M. Destino do fósforo aplicado ao solo em chorume de suínos sob cultivo no sul do Brasil. **Geoderma**, v. 321, p. 164-172, 2018.
- CAIONE, G.; FERNANDES, F. M.; LANGE, A. Efeito residual de fontes de fósforo nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, p. 189-196, 2013.
- CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M. F.; RHEINHEIMER, D. S. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 133, p. 32-39, 2013.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Aspectos agrônômicos e ambientais de fertilizantes fosfatados com variação de fonte e solubilidade: uma revisão atualizada. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n.1, p. 229-255, 2011.

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

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, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

DAMACENO, J. B. D.; FERREIRA, E.; DE OLIVEIRA, D. M.; DE SOUZA GUIMARÃES, R.; DA GAMA, R. T.; DE JESUS PADILHA, F. Produção de biomassa de *Brachiaria ruziziensis* adubada com farinha de ossos calcinada sob tratamentos ácidos. **Revista Agrogeoambiental**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2018.

DAMACENO, J. B. D.; LOBATO, A. C. N.; GAMA, R. T.; SILVA, C. A.; MARTINS, J. K. D.; OLIVEIRA, D. M.; TUCCI, C. A. F.; FALCÃO, N. P. S.; FERREIRA, E. Agronomic efficiency of bone meal under acidification in *Brachiaria ruziziensis* dry matter production in Western Amazon. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 34, n. 4, p. 1-7, 2019.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, p. 82-85, 1977.

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

DUDA, G. P.; GUERRA, J. G. M.; PEREIRA, M. G.; DOS ANJOS, L. H. C.; RIBEIRO, M. R. Avaliação da biodisponibilidade de fósforo em diferentes classes de solos do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1563-1575, 2013.

1034 EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília (DF): Embrapa Informação Tecnológica; Brasília, DF: Embrapa Solos, 2009. 627p.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 691-699, 2007.

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

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

JACOMINE, P. K. T.; ALMEIDA, J. C.; MEDEIROS, L. A. R. **Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do estado do Ceará**: descrição de perfis de solos e análises. Recife: MA/DNPEA - SUDENE/DRN, 502 p, 1973.

KOZEN, E. A.; ALVARENGA, R. C. **Fertilidade dos solos**: adubação orgânica. Cultivado milho. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2010, 6p.

MOHAPATRA, B., VERMA, D. K., SEN, A., PANDA, B. B., ASTHIR, B. Biofertilizers- A Gateway to Sustainable Agriculture. **Popular Kheti**, v. 1, n. 4, p. 97-106, 2013.

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

NOVAIS, R. F. **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, SP, 2007. 1017 p.

- OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 465-471, 2010.
- PARTELLI, F. L.; BUSATO, J. G.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P. A. P.; CANELLAS, L. P. Qualidade da matéria orgânica e distribuição do fósforo no solo de lavouras orgânicas de café Conilon. **Ciência Rural**, v. 39, n. 7, p. 2065-2072, 2009.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing; 2019. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 02 Jan. 2019.
- RHEINHEIMER, D. D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 151-160, 2001.
- RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, n. 1, p. 1050-1061, 2016.
- SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., DOS ANJOS, L. H. C., DE OLIVEIRA, V. A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília. Embrapa Solos, 2018.
- SHARPLEY, A. N.; SISAK, I. Differential availability of manure and inorganic sources of phosphorus in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p. 1503-1508, 1997.
- SILVA, J. V. de S.; CRUZ, S. C. S.; ALOVISI, A. M. T.; KURIHARA, C. H.; XAVIER, A. D.; MARTINEZ, M. A. Adubação fosfatada no feijoeiro cultivado sob palhada de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Ceres**, v. 65, n.2, p. 181-188, 2018.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. **Planaltina: Embrapa Cerrados**, v. 416, 2004.
- TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; CURTI, 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, n. 1, p. 171-179, 2011.
- VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; FONTES, L. E. F.; NEVES, J. C. L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 3, p. 343-347, 1993.