

Fósforo remanescente em solos formados sob diferentes materiais de origem em três topossequências, Pinheiral- RJ¹

Remaining phosphorus in soils developed from different parent materials in three topossequences, Pinheiral-RJ

Ademir Fontana^{2*}; Marcos Gervasio Pereira³; Adailde Carmo dos Santos⁴;
Thiago Andrade Bernini⁵; Lúcia Helena Cunha dos Anjos³;
Carlos Fernando Dorronsoro Fernández⁶; Francisco José Martins Peinado⁶

Resumo

Este trabalho teve o objetivo de avaliar os teores do fósforo remanescente e correlacioná-los com os atributos químicos, físicos e mineralógicos em horizontes de solos formados a partir de diferentes materiais de origem em três topossequências no município de Pinheiral, RJ. Foram descritos e coletadas amostras de horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B+C) de 14 perfis de solos sob pastagem em três topossequências (T1, T2 e T3), sendo T1 sob basalto, T2 sob muscovita-biotita-gnaiss e T3 sob gabro. Foram realizadas as análises químicas e físicas de rotina, bem como Al e Fe pelo ataque sulfúrico e fluorescência de raios X, Fed (ditionito-citrato-bicarbonato de sódio) e Feo (oxalato ácido de amônio), superfície específica da argila (SE), mineralogia da argila e óxido, e fósforo remanescente (Prem). Variações dos teores de Prem foram observadas, as quais relacionadas à natureza do material de origem, posição na paisagem e grau de desenvolvimento dos solos, o que pode ser analisado pelas variações dos atributos químicos, físicos e mineralógicos. Os teores de Prem seguiram a ordem T2 > T1 = T3 no horizonte A e da T1 > T3 e T2 ~ T1 e T3 nos horizontes B+C. Foram observadas correlações negativas entre os teores de Prem com Fe₂O₃ (raios X) > Fed > SE > Feo nos horizontes A e com Fe₂O₃ (ataque sulfúrico) > Fe₂O₃ (raios X) > argila > Fed > Feo nos horizontes B+C. As análises de componentes principais e agrupamento hierárquico contribuíram para avaliação conjunta dos dados, evidenciando os atributos relacionados e as similaridades entre os solos.

Palavras-chave: Adsorção de fosfato, horizontes superficiais e subsuperficiais, atributos dos solos

Abstract

This work aimed to evaluate the remaining phosphorus tenors and correlate with the chemical, physical and mineralogical attributes in soils horizons developed from different parent materials in three topossequences in the municipality of Pinheiral, RJ. Were described and collected samples of surface

¹ Parte da Tese de Doutorado do terceiro autor apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Ciência do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. BR 465 Km 7, Seropédica, RJ.

² Pesquisador A, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: ademir.fontana@embrapa.br

³ Profs. Associado IV, Depto de Solos, UFRRJ, Seropédica, RJ. Bolsista da FAPERJ e CNPq. E-mail: gervasio@ufrj.br; lanjoso@ufrj.br

⁴ Prof^a Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus Valença, Valença, BA. E-mail: adacsantos@gmail.com

⁵ Eng^o Agr^o, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Campus Pinheiral, Pinheira, RJ. E-mail: thiagoagronomo@ibest.com.br

⁶ Profs. do Dept^o de Edafología y Química Agrícola- Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Fuente Nueva, Granada, Espanha. E-mail: cfdorron@ugr.es; fjmartin@ugr.es

* Autor para correspondência

horizons (A) and subsurface (B+C) from 14 soils profiles under pasture in three toposequences (T1, T2 and T3), being T1 under basalt, T2 under muscovite-biotite-gneiss and T3 under gabbro. Chemical and physical routine analyses as well as Al and Fe by sulfuric acid attack and X-ray fluorescence, Fed (dithionite-citrate-bicarbonate) and Feo (ammonium oxalate), clay specific surface (SS), clay and oxide mineralogy and remaining phosphorus (Prem), were taken. Variations in the Prem tenors were observed, which related to the nature of parent material, landscape position and soils development degree, which can be analyzed by the chemical, physical and mineralogical variations. The Prem tenors followed the order $T2 > T1 = T3$ in A horizons and $T1 > T3$ and $T2 \sim T1$ e $T3$ in B+C horizons. Negative correlations between Prem tenors with Fe_2O_3 (X rays) $> Fed > SS > Feo$ in the A horizon and with Fe_2O_3 (sulfuric acid) $> Fe_2O_3$ (X rays) $> clay > Fed > Feo$ in the B+C horizons, were observed. The principal components and hierarchical clustering analysis contributed to the joint data evaluation, showing the related attributes and the similarity between soils.

Key words: Phosphate adsorption, surface and subsurface horizons, soils attribute

Introdução

Os solos de regiões tropicais são conhecidos pela elevada capacidade de adsorção específica de ânions fosfato (fixação de fósforo) das fontes solúveis de fertilizantes, deixando-o indisponível e gerando déficit deste nutriente ao longo do ciclo de cultivo de culturas pela redução da concentração de fósforo na solução do solo. Dessa forma são necessárias adubações para sanar as possíveis deficiências nutricionais decorrentes desse fenômeno.

A adsorção de fosfato nestes solos ocorre por meio de troca de ligantes por íons fosfato em solução nas argilas silicatadas e, principalmente, na superfície dos óxidos e hidróxidos, formando complexos de esfera interna, não trocáveis (PARFITT, 1978; SPOSITO, 1989; ALCARDE; GUIDOLIN; LOPES, 1991). Este fenômeno é favorecido pelas características dos minerais da fração argila, como a composição por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que apresentam cargas de superfície variáveis segundo a reação da solução do solo, estando carregadas positivamente na maioria dos solos oxidicos em regiões de clima tropical (SPOSITO, 1989).

Assim, a magnitude deste fenômeno é influenciada pela natureza e quantidade dos sítios de adsorção, sendo estes relacionados aos teores de argila, composição mineralógica das frações argila e óxidos, a superfície específica, ao grau de cristalinidade e ao teor de matéria orgânica e frações húmicas (FONTES; WEED, 1996; ANDRADE

et al., 2003; ALMEIDA; TORRENT; BARRÓN, 2003; ROLIM NETO et al., 2004; ANTELO et al., 2007; FONTANA et al., 2008; GONÇALVES et al., 2011).

Diante da indisponibilização do fosfato solúvel, estudos tem se desenvolvido com solos brasileiros visando avaliar a capacidade máxima de adsorção e do fósforo remanescente (ALVAREZ et al., 2000; VALLADARES; PEREIRA, ANJOS, 2003; ROLIM NETO et al., 2004; SOUZA et al., 2006; VILAR et al., 2010; GONÇALVES et al., 2011). Essa determinação proposta por Bache e Williams (1971) apresenta-se como uma solução prática para se obter um índice do fator capacidade de adsorção de fosfato dos solos. Nesta proposta, a quantidade de fósforo que permanece na solução é dependente da atuação combinada da concentração de fosfato adicionada e do tempo de contato (ALVAREZ; FONSECA, 1990) e da capacidade de adsorção dos solos (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Sob o aspecto da capacidade de adsorção de cada solo, os atributos relacionados podem variar amplamente entre diferentes solos, sendo reflexo principalmente de características tais como: composição química e mineralógica, textura, e natureza do material de origem (sedimentos ou rochas). Neste sentido, Valladares, Pereira e Anjos (2003) observaram que solos originários de rochas de natureza basáltica apresentaram maior capacidade de adsorção de fósforo, estando essa relacionado com atributos como a superfície específica, os teores de argila, Al_2O_3 , Fed e Feo. Gonçalves et al. (2011)

observaram que solos formados dos sedimentos do intemperismo do basalto apresentaram maior capacidade de adsorção de fósforo em relação aqueles formados de sedimentos de granito e arenito. Os autores verificaram que as variações na capacidade de adsorção estavam relacionadas aos teores Fe_2O_3 , Fed, Feo e argila.

A partir do exposto, esse estudo teve como objetivo avaliar os teores do fósforo remanescente e correlacioná-los com os atributos químicos, físicos e mineralógicos em horizontes de solos formados a partir de diferentes materiais de origem em três topossequências no município de Pinheiral, RJ.

Material e Métodos

A área de estudo situa-se na região do Médio Paraíba do Sul, município de Pinheiral – RJ, entre as latitudes $22^\circ 29' 03''$ e $22^\circ 35' 27''$ S, e longitudes $43^\circ 54' 49''$ e $44^\circ 04' 05''$ W, com altitude variando entre 343 a 547m. Foram coletadas amostras de horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B e C) de trincheiras abertas no topo, terço superior, terço médio, terço inferior e baixada, de topossequências (T1, T2 e T3) formadas a partir de diferentes tipos de material de origem em áreas de pastagem nativa. Para a T1 tem-se como material de origem, rochas ígnea extrusiva básica (basalto) ou sedimentos oriundos do intemperismo desta. A T2 é formada por rocha metamórfica ácida (muscovita-biotita-gnaïsse) ou sedimentos desta, e a T3, originada a partir de rocha intrusiva básica (gabro).

Os perfis foram descritos e coletados segundo Santos et al. (2005). As amostras foram coletadas, secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,00 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) na qual foram realizadas as análises. Foram determinados o teor de carbono orgânico total (COT); pH em água e KCl; cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+}); fósforo assimilável (P); acidez potencial (H+Al) e calculada a soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC) e a saturação por bases (V%). Também foi

determinada a composição granulométrica (teores de areia, silte e argila) e teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 pelo ataque sulfúrico 1:1 (EMBRAPA, 1997).

Os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 por fluorescência de raios X foram obtidos a partir da TFSA previamente tratadas com 5,4 g de tetraborato de lítio. Seguiu-se com aquecimento a 1.100°C até fundirem-se e formarem pastilhas, usando prensa hidráulica. As pastilhas foram analisadas em espectrômetro sequencial de longitude de onda dispersiva Philips Magix Pro (PW-2440), com gerador de raios X de ânodo RH operando a 4 kw (HALLETT; KYLE, 1993) e quatro filtros de alumínio de 200 e 750μ , bronze de 300μ e chumbo. As curvas de calibração foram obtidas com amostras-padrão. Para calcular as perdas de carbonato, uma amostra de solo foi calcinada a 1.000°C em mufla durante 1 hora. Os resultados foram interpretados por programa analítico para análises quantitativas e semiquantitativas IQ+.

Os teores de Fed e Feo foram determinados na TFSA após extração com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, segundo Mehra e Jackson (1960), modificado por Schulze (1984) e com solução de oxalato ácido de amônio, na ausência de luz, de acordo com Schwertmann (1964).

A superfície específica foi quantificada seguindo as medidas de adsorção de moléculas polares (éter monoetílico de etileno glicol – EMEG) e da superfície específica teórica de determinados minerais de argila tomados como padrão (caulinita e montmorilonita) (DYAL; HENDRICKS, 1950; HEILMAN; CARTER; GONZALEZ, 1965). A amostra de solo (1 g) foi previamente seca em estufa de 110°C por 24 horas, seguindo para dessecador conectado a uma bomba pneumática, contendo CaCl_2 e EMEG. Foi aplicado vácuo por meio de uma bomba, durante 45 minutos, sendo esta operação repetida até a obtenção da constância de peso da amostra (EMBRAPA, 1997).

Para a análise mineralógica da fração argila foi realizada a difração de raios X (DRX) em lâminas

orientadas, montadas com suspensão de argila total ($< 2,0 \mu\text{m}$) e obtidas por sedimentação após dispersão com NaOH 1mol L^{-1} , sem eliminação de óxidos de ferro (EMBRAPA, 1997). A caracterização mineralógica foi realizada em difratômetro Bruker AXS, modelo D8 Advance, empregando-se radiação de $K\alpha$ de $\lambda 0,015405 \text{ nm}$, produzida por tubo de cobre, 40 kv e 40 mA , com amplitude de varredura igual a $1^\circ 2\theta$ por minuto ($0,04^\circ/\text{s}$). Para as amostras com indicação de presença de minerais 2:1, foram feitos os pré-tratamentos de aquecimento a 550° C , saturação com etilenoglicol e dimetilsulfóxido, com posterior irradiação pelos raios X.

Para obtenção da fração óxidos de ferro, a fração argila foi submetida ao tratamento com NaOH 5 mol L^{-1} para obtenção da fração rica em óxidos de ferro (Fe-concentrada), segundo Norrish e Taylor (1961), modificado por Kämpf e Schwertmann (1982). A caracterização mineralógica foi realizada em amostras em pó não orientado em difratômetro Bruker AXS, modelo D8 Advance, com radiação de $K\alpha$ de $\lambda 0,015405 \text{ nm}$ e tubo de cobre, 40 kv e 40 mA , com amplitude de varredura igual a $1^\circ 2\theta$ por minuto. As interpretações qualitativas e quantitativas dos difratogramas foram obtidas mediante a utilização do programa de identificação mineral X Powder versão 2004.

O fósforo remanescente (Prem) foi determinado utilizando-se um volume de 5 cm^3 de TFSA, sendo este colocado em contato por 1 hora com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ contendo 50 mg L^{-1} de fósforo (ALVAREZ V.; FONSECA, 1990). Após a homogeneização realizou-se filtragem e na solução de equilíbrio foi determinada a concentração de fósforo utilizando-se o método do ácido ascórbico, modificado por Braga e Defelipo (1972). Com base nos teores de fósforo remanescente (Prem), cada perfil foi classificado em relação à capacidade de adsorção de fosfato, sendo: MB= muito baixa ($46-60 \text{ mg L}^{-1}$); B= baixa ($31-45 \text{ mg L}^{-1}$); M= média ($21-30 \text{ mg L}^{-1}$); A= alta ($11-20 \text{ mg L}^{-1}$); MA= muito alta ($6-10 \text{ mg L}^{-1}$); EA= extremamente alta ($0-5 \text{ mg L}^{-1}$) (ALVAREZ V. et al., 2000).

Os resultados foram submetidos à análise de correlação de Pearson entre o Prem e os atributos dos solos, além de análises de variâncias e comparações das médias pelo teste F e Tukey. Os teores de COT; pH em água e KCl; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} ; CTC; argila; P; Prem; Al_2O_3 e Fe_2O_3 (raios X); Fed e Feo; SE, foram selecionados para realização das análises multivariadas. Para a análise de componentes principais foi feita a ordenação dos atributos em dois eixos ortogonais de acordo com a variância total dos atributos, e, para a análise de agrupamento hierárquico a distribuição dos perfis/horizontes em dendograma de similaridade. Para a análise de agrupamento hierárquico foi utilizado o método de agrupamento pareado igualmente ponderado e como medida de similaridade a distância euclidiana. Ambas as análises multivariadas foram realizadas pelo programa Statistica 7.0.

Resultados e Discussão

A partir dos teores de fósforo remanescente (Prem), os horizontes dos perfis de cada toposequência foram classificados nas diferentes classes de capacidade de adsorção de fosfato (ALVAREZ V. et al., 2000). Os horizontes A foram classificados variando de "baixa a alta" capacidade de adsorção e os horizontes B+C de "alta a extremamente alta" (Tabela 1). Destacam-se variações específicas principalmente no horizonte A do perfil T3P1 e com ausência de um padrão definido para os horizontes B+C da T1 e T2.

As variações dos teores de Prem observadas entre os horizontes A e B+C nas toposequências indicam padrões diferenciados na adsorção específica de fósforo. Estas variações estão relacionadas à natureza do material de origem, posição na paisagem, grau de desenvolvimento dos solos, o que pode ser analisado pelas variações dos atributos químicos, físicos e mineralógicos. Considerações semelhantes foram verificadas por Rolim Neto et al. (2004) em estudo com solos desenvolvidos sob rochas básicas-alcalinas e ultrabásicas no Alto

Paranaíba, onde os autores observaram distribuição errática dos teores de Prem nos horizontes B de três topossequências, atribuindo como principais fatores para as variações observadas a textura, dos atributos químicos e mineralógicos dos horizontes estudados.

Tabela 1. Classes de solos e classificação dos horizontes A e B+C de acordo com os teores de fósforo remanescente (Prem).

Topo/Perfil	Classificação Taxonômica dos Solos	mg L ⁻¹	
		A	B+C
T1P1	Nitossolo Háptico Distrófico típico	24 (M)	5 (EA)
T1P2	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	21 (M)	10 (MA)
T1P3	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	20 (A)	11 (A)
T1P4	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	25 (M)	12 (A)
T1P5	Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico	20 (A)	23 (M)
T2P1	Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico	30 (M)	23 (M)
T2P2	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	31 (B)	16 (A)
T2P3	Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico	29 (M)	13 (A)
T2P4	Argissolo Amarelo Eutrófico típico	28 (M)	9 (MA)
T2P5	Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico	29 (M)	24 (M)
T3P1	Nossolo Regolítico Eutrófico típico	25 (M)	-
T3P2	Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico	18 (A)	4 (EA)
T3P3	Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico	13 (A)	7 (MA)
T3P4	Chernossolo Argilúvico Órtico saprolítico	17 (A)	7 (MA)

MB= muito baixa (46-60 mg L⁻¹); B= baixa (31-45 mg L⁻¹); M= média (21-30 mg L⁻¹); A= alta (11-20 mg L⁻¹); MA= muito alta (6-10 mg L⁻¹); EA= extremamente alta (0-5 mg L⁻¹).

Fonte: ALVAREZ V. et al. (2000)

* Topo = topossequência.

Fonte: Elaboração dos autores

Tabela 2. Comparação de médias dos teores de fósforo assimilável (P) e remanescente (Prem) para os horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B+C).

Topossequência	Material de Origem	P		Prem	
		A	B+C	A	B+C
		mg kg ⁻¹		mg L ⁻¹	
Total		4	3	24 a	13 b
T1	Rocha básica (basalto)	5	7 A	22 Ba	12 ABb
T2	Rocha ácida (muscovita-biotita-gnaiss)	2	1 B	29 Aa	17 Ab
T3	Rocha básica (gabro)	5	1 B	18 Ba	6 Bb

* Letras iguais e maiúsculas na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a p<0,01 nos horizontes A e a p<0,08 nos horizontes B+C.

* Letras iguais e minúsculas na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste F a p<0,05.

Fonte: Elaboração dos autores.

No que se refere aos teores de fósforo assimilável (P), não foram observadas diferenças entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, com ampla variação dos valores entre 0 e 15 e, 0 e 11 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Diferentemente, os teores de Prem apresentam ampla variação e diferença estatística significativa entre as médias totais dos horizontes A e B+C, com maiores valores no horizonte A, entre 13 e 31mg L⁻¹ (média 24) e entre 4 e 24mg L⁻¹ (média de 13) nos horizontes B+C (Tabelas 1 e 2).

Em solos de diversas regiões do Brasil e formados sob diferentes materiais de origem, Valladares, Pereira e Anjos (2003) observaram teores de Prem entre 20,0 e 40,8mg L⁻¹ nos horizontes A e entre 7,8 e 35,7mg L⁻¹ nos horizontes B, sendo que para ambos os horizontes, os menores teores foram observados no Latossolo Bruno formado a partir de rochas básicas e alcalinas e os maiores no Argissolo Amarelo originado de rochas sedimentares e sedimentos diversos. Em solos do estado de Minas Gerais, Souza et al. (2006) observaram teores entre 8,3 e 26,8mg L⁻¹ nos horizontes A, sendo os menores

teores observados no Latossolo Vermelho e os maiores no Neossolo Quartzarênico. Eberhardt et al. (2008) quantificaram em Latossolos do cerrado nos horizontes A valores entre 5,2 e 40,8mg L⁻¹. Em solos desenvolvidos sob rochas básicas-alcalinas e ultrabásicas no Alto Paranaíba, Rolim Neto et al. (2004) observaram ampla variação e teores entre 0 e 22mg L⁻¹ nos horizontes B de Latossolos e Cambissolos.

Para ambos os horizontes A e B+C, observa-se que os atributos relacionados à mineralogia se destacam como condicionantes da adsorção específica de fósforo, como observado pelos valores das correlações entre os teores de Prem e atributos químicos, físicos e mineralógicos analisados, sendo a magnitude de adsorção de fósforo entre horizontes superficiais e subsuperficiais observada pelas diferenças de correlações em cada horizonte. Neste sentido, destacam-se as correlações negativas do Prem nos horizontes A em ordem decrescente com Fe₂O₃ (raios X) > Fed > SE > Feo (-0,86 e -0,71), enquanto, para os horizontes B+C com Fe₂O₃ (ataque sulfúrico) > Fe₂O₃ (raios X) > argila > Fed > Feo (-0,81 e -0,62) (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficiente de correlação simples entre Prem e atributos dos horizontes A (n=14) e B+C (n=13).

Atributos	A	B+C	Atributos	A	B+C
pH (água)	-0,32	-0,58*	Al ₂ O ₃ ⁽²⁾	-0,27	-0,54
Ca ²⁺	-0,54*	-0,57*	F ₂ O ₃ ⁽²⁾	-0,86*	-0,80*
Mg ²⁺	-0,41	-0,24	Al ₂ O ₃ ⁽³⁾	-	-0,57*
Al ³⁺	0,29	0,60*	F ₂ O ₃ ⁽³⁾	-	-0,81*
CTC ⁽¹⁾	-0,57*	-0,54	Fed ⁽⁴⁾	-0,84*	-0,63*
COT ⁽¹⁾	-0,25	0,08	Feo ⁽⁴⁾	-0,71*	-0,62*
Argila	-0,39	-0,67*	SE ⁽¹⁾	-0,75*	-0,59*

* Indica probabilidade p<0,05.

⁽¹⁾ CTC: capacidade de troca catiônica a pH 70; COT: carbono orgânico total; SE: superfície específica.

⁽²⁾ Obtido pelo raio X por fluorescência;

⁽³⁾ Obtido pelo ataque sulfúrico (1:1)

⁽⁴⁾ Fed: ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato; Feo: ferro extraído com oxalato de amônio.

Fonte: Elaboração dos autores.

As correlações negativas do Prem com pH (água), Ca^{2+} e CTC indicam que as reações que controlam a disponibilidade de fosfato estão relacionadas também a presença de cátions na solução do solo, principalmente em solos com altos teores de bases trocáveis, como o Ca^{2+} e Mg^{2+} . Segundo Meurer, Rheinheimer e Bissani (2006), a presença dos cátions solúveis em altos teores potencializa a formação de fosfato insolúvel nos solos. Enquanto, a correlação positiva do Prem com Al^{3+} (0,60*) nos horizontes B e C deve ser analisada como uma correlação espúria, estando a hipótese relacionada à superestimação dos teores de Al^{3+} nos horizontes Bi (T2P1) e Cg (T1P5 e T2P5) levando a inflexão positiva da linha de tendência. Nos horizontes pouco intemperizados (Bi), o cloreto de potássio utilizado como extrator provoca a dissolução das formas de alumínio de baixa cristalinidade e do alumínio interstratificado, que são formas não trocáveis (MARQUES et al., 2002; ABREU JUNIOR; MURAOKA; LAVORANTE, 2003). No horizontes C glei, os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (raios X e ataque sulfúrico) bastante inferiores aos demais horizontes Bw, Bt e Bi (Tabela 4), confere menor adsorção de fosfato.

Sob o aspecto das relações com atributos dos solos, Souza et al. (2006) observaram correlação negativa do Prem com os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), assim como, Eberhardt et al. (2008) correlações negativas do Prem com Fe_o e $\text{Al}_o > \text{Fed}$ e $\text{Al}_d > \text{argila}$. Avaliando a relação entre a capacidade de adsorção de fósforo em diferentes solos, Valladares, Pereira e Anjos (2003) observaram correlações entre positivas nos horizontes A com $\text{SE} > \text{argila} > \text{Al}_2\text{O}_3$ (ataque sulfúrico) = Fed e nos horizontes B com Al_2O_3 (ataque sulfúrico) $> \text{SE} > \text{argila} > \text{Fed} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ataque sulfúrico), assim como, Gonçalves et al. (2011) verificou correlação na seguinte sequência $\text{Fe}_o > \text{Fed} > \text{argila}$.

Para horizontes B, Rolim Neto et al. (2004) observaram correlação negativa entre a capacidade de adsorção e Fed , enquanto, Vilar et al. (2010) verificaram correlação positiva com Fed . Em estudo detalhado com as frações de fósforo nos solos, Almeida, Torrent e Barrón (2003) observaram em Latossolos desenvolvidos de basalto nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul menores teores de fósforo na superfície dos óxidos de maior cristalinidade, identificados pelos maiores teores de Fed .

Diferenças também foram observadas quando feita a análise individual de cada topossequência, sendo os maiores teores de Prem verificados no horizonte A (Tabela 2). Os maiores teores de Prem nestes horizontes são atribuídos aos menores teores de argila, Al_2O_3 e Fe_2O_3 (raios X), Fed e SE (Tabela 5), uma vez que os atributos relacionados com o Prem são os mesmos para os horizontes A e B+C, como observados pelas correlações negativas na Tabela 3.

Entre as topossequências, a T2 apresentou os maiores teores Prem no horizonte A, enquanto nos horizontes B+C houve diferença entre T2 e T3 e intermediário para T1, com ampla variação dos teores de Prem nas T1 e T2 (Tabela 2). Verifica-se que, entre os atributos relacionados à adsorção de fósforo, a T2 apresentou nos horizontes A os menores teores de Fe_2O_3 (raios X e ataque sulfúrico), Fed , Fe_o e SE e, nos horizontes B+C os menores teores de Fe_2O_3 (raios X e ataque sulfúrico) e SE (Tabela 5). Estes atributos estão correlacionados negativamente com os teores de Prem (Tabela 3). Na T2 ainda, destaca-se os baixos teores de argila nos horizontes A, associados à formação do horizonte B textural nos Argissolos e do baixo grau de desenvolvimento dos Cambissolos (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos nas três toposequências.

Topo/Perfil	Hor ⁽¹⁾	pH		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	CTC ⁽¹⁾	COT ⁽¹⁾	Argila	P	Al ₂ O ₃ ⁽²⁾	F ₂ O ₃ ⁽²⁾	Al ₂ O ₃ ⁽³⁾	F ₂ O ₃ ⁽³⁾	Fed ⁽⁴⁾	Feo ⁽⁴⁾	SE ⁽¹⁾
		água	KCl														
T1P1	A	5,2	4,2	1,9	2,9	0,3	11,1	18,9	518	0	170	190	190	190	4,7	3,2	102,8
	Bt3	4,8	4,1	0,5	0,6	0,4	6	4,1	747	3	240	190	195	178	5,6	1,2	250,4
T1P2	A	4,7	4,1	1,3	1,6	0,5	10,2	18,5	585	1	210	210	189	190	5,9	1,0	295,1
	Bw2	4,9	4,0	0,4	0,7	0,9	6,8	5,7	723	5	240	210	189	190	9,0	2,2	282,1
T1P3	A	5,2	4,3	1,7	2,3	0,2	10,9	21,7	596	3	210	200	201	170	12,5	3,2	199,5
	Bw3	5,2	4,5	1,5	0,8	0,2	6,3	4,9	776	11	250	190	201	170	16,9	1,5	305,7
T1P4	A	6,6	5,6	5,9	3,1	0,1	11,9	22,1	453	6	180	200	202	170	8,5	3,2	111,7
	Bw2	5,8	5,3	2,8	2,1	0,1	7,7	2,8	691	8	250	190	202	170	14,1	2,1	273,5
T1P5	A	5,1	4,3	4,9	1,2	0,1	17,2	36,8	250	15	110	100	52	62	3,4	1,7	170,7
	Gg1	4,4	3,5	0,7	0,8	1,4	6,9	8,1	213	6	80	60	52	62	1,4	0,3	76,9
T2P1	A2	5,8	4,6	2,0	2,6	0,1	8,1	17,7	210	2	100	20	164	50	1,4	1,3	51,2
	Bi2	5,1	3,7	0,3	4,1	1,3	8,7	3,8	400	1	220	50	164	50	1,9	1,2	180,7
T2P2	A2	5,4	4,2	1,4	1,1	0,2	6,2	13,1	244	2	100	20	210	63	1,6	1,4	38,2
	Bt2	5,6	4,5	0,6	3,2	0,2	6,7	3,2	606	1	220	60	210	63	6,1	0,8	88,8
T2P3	A	5,5	4,4	1,7	1,6	0,1	7,8	14,7	254	1	100	20	199	64	1,7	1,4	47,0
	Bw2	5,6	4,6	1,2	3,3	0,2	7,8	4,1	566	1	240	70	199	64	6,9	0,8	87,0
T2P4	A	5,8	4,7	2,3	1,9	0,1	7,5	14,0	207	1	100	20	162	67	1,9	1,4	31,2
	Bt2	5,9	4,0	1,4	2,6	2,0	8,2	2,4	410	1	220	60	162	67	3,1	1,0	83,2
T2P5	A	5,5	4,2	2,2	1,8	0,4	9,6	17,7	190	2	100	30	57	24	1,9	0,4	44,5
	Gg1	5,1	3,5	0,4	0,8	1,8	4,8	3,4	229	3	120	20	57	24	1,4	1,0	37,1
T3P1	Al	6,5	5,5	12,8	8,6	0,0	22,8	40,0	364	11	150	170	125	180	8,5	6,4	190,5
	A	6,4	5,2	10,1	6,3	0,0	18,3	25,2	314	3	120	240	169	180	17,6	7,2	213,5
T3P2	Bt	6,4	4,9	13,9	6,0	0,0	20,9	5,1	543	1	220	200	169	180	10,8	7,5	224,3
	A	6,6	5,2	9,3	5,3	0,0	15,7	18,4	340	1	120	250	178	170	15,2	7,3	179,7
T3P3	Bt	6,5	5,1	14,2	2,2	0,0	16,9	5,6	495	0	210	200	178	170	11,0	4,6	377,5
	A	6,8	5,4	7,8	3,9	0,0	12,4	14,9	291	4	100	220	125	180	11,6	5,5	148,5
T3P4	Bt1	6,7	5,3	8,0	4,0	0,0	12,5	4,4	566	2	150	220	125	180	12,7	3,6	188,0

(1) Hor: horizonte; CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; COT: carbono orgânico total; SE: superfície específica.

(2) Obtido pelo raio X por fluorescência;

(3) Obtido pelo ataque sulfúrico (1:1)

(4) Fed: ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato; Feo: ferro extraído com oxalato de amônio.

Fonte: Elaboração dos autores.

Associado ainda à adsorção de fósforo nos solos observa-se na composição mineralógica da fração argila dos horizontes A e B+C o predomínio de minerais 1:1 (caulinita) e óxido de ferro (goethita) na T1 e T2, tendo a T2 presença de minerais primários (mica), enquanto, minerais 1:1 (caulinita) e 2:1 (illita-montmorilonita) na T3. Já, na fração óxidos, os horizontes B+C apresentam o predomínio de goethita, seguida de hematita, além de outros minerais na T3 (Tabela 6). Assim, as diferenças nos teores de Fe_2O_3 , Fed, Feo e SE destacados nas Tabelas 4 e 5, são o reflexo da maior ou menor participação do óxido de ferro goethita, principalmente.

Segundo Bahia Filho et al. (1983) a goethita é considerada a principal responsável pelo fenômeno de adsorção específica de fósforo nos solos do Brasil Central. Outros trabalhos também tem apresentado maior capacidade de adsorção de fósforo em solos com maior teor de goethita quando comparada a hematita (BIGHAM et al., 1978; JONES, 1981; KARIM; ADAMS, 1984; FONTES; WEED, 1996). Eberhardt et al. (2008) observaram em Latossolos do cerrado correlações negativas e significativas entre a gibbsita, goethita e hematita com Prem (-0,64, -0,64 e -0,43, respectivamente), enquanto a caulinita não exerceu influência sobre o Prem (-0,17). Segundo Fontes e Weed (1996) em Latossolos brasileiros a gibbsita, goethita e hematita, explicam mais de 95 % da variação na adsorção máxima de fosfato.

Em Latossolos do Estado de São Paulo, Alves e Lavorenti (2004), observaram maiores valores de correlação negativa da goethita em relação à hematita com os teores de Prem, estando essa maior adsorção relacionada às suas propriedades intrínsecas, tais como o menor grau de cristalinidade, maior substituição do Al, maior superfície específica e maior quantidade de faces expostas para adsorção (ALVES; LAVORENTI, 2004). Essa maior capacidade de adsorção dos solos goethíticos foi também constatada por Curi e Franzmeier (1984), sendo creditada à facilidade de acesso do fosfato aos grupos OH- de superfície (FROSSARD et al., 1994),

Tabela 5. Comparações das médias dos atributos químicos, físicos e mineralógicos.

Topo ⁽¹⁾	Argila		Al_2O_3 ⁽²⁾		Fe_2O_3 ⁽²⁾		Al_2O_3 ⁽³⁾		Fe_2O_3 ⁽³⁾		Fed ⁽⁴⁾		Feo ⁽⁴⁾		SE ⁽¹⁾	
Horiz	A	B+C	A	B+C	A	B+C	B+C	B+C	A	A	B+C	A	B+C	A	A	B+C
Total	344 b	535 a	133,5 b	204,6 a	135,0	132,3	161,7	120,6	6,9	7,7	3,2	2,1	130,3	188,9		
T1	480 A	630	176,0 A	212,0	180,0 A	168,0 A	167,8	154,0 A	7,0 B	9,4 AB	2,5 B	1,5 B	176,0 A	213,7 A		
T2	221 Bb	442 a	100,0 Bb	204,0 a	22,0 Bb	52,0 Ba	158,4	53,6 B	1,7 Cb	3,9 Ba	1,2 C	1,0 B	42,4 Bb	95,4 Ba		
T3	327 Bb	535 a	122,5 Bb	193,3 a	220,0 A	206,7 A	157,7	176,6 A	13,2 A	11,5 A	6,6 A	5,2 A	183,0 A	263,3 A		

* Letras iguais e minúsculas na mesma linha não diferem estatisticamente pelo teste F a $p < 0,05$.

* Letras iguais e maiúsculas na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a $p < 0,05$.

⁽¹⁾ Topo: Topossequência; Horiz: horizonte; SE: superfície específica em $m^2 g^{-1}$; Argila em $g kg^{-1}$;

⁽²⁾ Obtido pelo raito X por fluorescência em $g kg^{-1}$;

⁽³⁾ Obtido pelo ataque sulfúrico (1:1) em $g kg^{-1}$;

⁽⁴⁾ Fed: ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato; Feo: ferro extraído com oxalato de amônio em $g kg^{-1}$

Fonte: Elaboração dos autores.

uma vez observada maior área superficial específica (TORRENT; SCHWERTMANN, BARRÓN, 1994; ROLIM NETO et al., 2004).

Entretanto Torrent, Schwertmann e Barrón (1992; 1994), encontraram valores médios de adsorção de fósforo para goethitas similares aos de hematitas, mas a variabilidade entre as amostras

de hematita foi muito maior. Tais variações podem ser resultantes de diferenças nas características estruturais, relacionadas com as dimensões dos cristais, faces do cristal e presença de domínios na estrutura interna dos mesmos, que podem favorecer maior ou menor adsorção (TORRENT, 1997).

Tabela 6. Composição mineralógica da fração argila e óxidos.

Topossequência	Argila	Óxidos
	A, B+C	B+C
T1	caulinita>>goethita	goethita>hematita>ilmenita
T2	caulinita>>mica>goethita	goethita>hematita>caulinita>maghemita/magnetita
T3	caulinita>>illita-montmorilonita	goethita>hematita>ilmenita>ferrihidrita/maghemita

Fonte: Elaboração dos autores.

Outras variações podem estar relacionadas com a presença de outros minerais da fração óxidos, como a presença de maghemita, magnetita e illmenita, as quais também contribuem para maior adsorção de fósforo (SOUZA; LOBATO, 2004). A presença de maghemita tem se mostrado comum em vários solos, principalmente naqueles derivados de rochas vulcânicas básicas (COSTA et al., 1999).

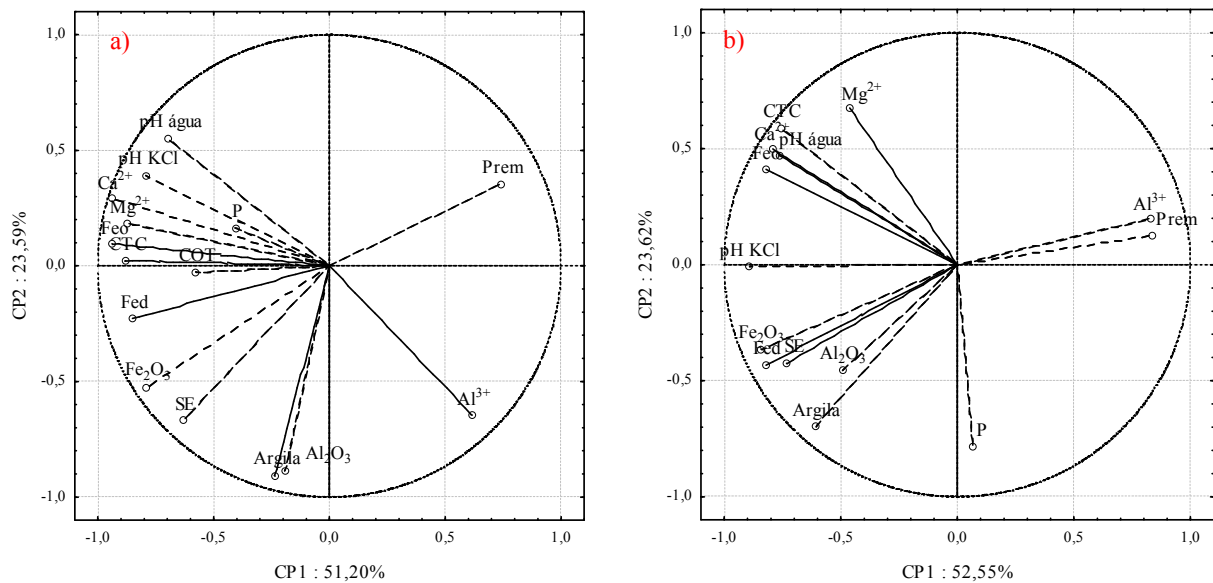
Pelos dados da distribuição dos atributos na análise multivariada de componentes principais, observou-se que os teores de Prem e os atributos que representam a mineralogia dos solos estão dispostos de forma antagônica, evidenciando a capacidade dos óxidos de ferro e alumínio na adsorção específica de fósforo, tanto nos horizontes A como B+C (Figura 1ab). Padrão semelhante da distribuição dos atributos foi observado por Eberhardt et al. (2008) em horizontes A de Latossolos do cerrado, antagônica com a mineralogia, e correlação negativa com atributos pH (água), Ca^{2+} , Mg^{2+} e SB e perpendicular ao Al^{3+} .

Pela análise de agrupamentos hierárquicos, observa-se pelo dendograma nos horizontes A

três grupos em relação à similaridade (Figura 2a), destacando os agrupamentos dos perfis de acordo com os materiais de origem: grupo I, perfis sob basalto; grupo II, perfis sob muscovita-biotita-gnaiss e grupo III, perfis sob gabro e o perfil T1P5 (basalto). A presença do perfil T1P5 no grupo III, indica que a localização na baixada com recebimento de sedimentos o aproxima dos perfis sob gabro, como observado pelos teores de Ca^{2+} , argila, Al_2O_3 (raios X) e CTC.

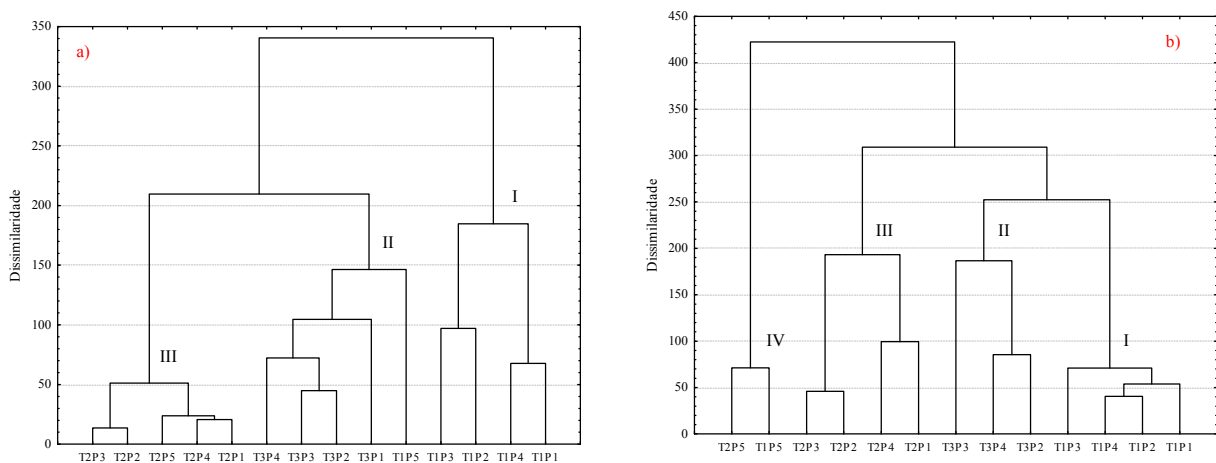
No dendograma dos horizontes B+C (Figura 2b), destacam-se quatro grupos em relação à similaridade, destacando: grupo I, perfis sob basalto; grupo II, perfis sob muscovita-biotita-gnaiss; grupo III, perfis sob gabro e grupo IV, representado pelos perfis T1P5 e T2P5, com subsuperficiais C glei, estando localizados na parte baixa da paisagem e com padrões diferenciados dos demais, com baixos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (raios X), menores superfície específica, teores de Fed, Feo e argila, e maiores teores de Al^{3+} e Prem.

Figura 1. Dispersão dos atributos pela análise de componentes principais dos horizontes A (a) e B+C (b).



Fonte: Elaboração dos autores.

Figura 2. Agrupamento das topossequências e perfis para os horizontes A (a) e B+C (b).



Fonte: Elaboração dos autores.

Conclusões

Os teores de Prem apresentaram em ordem decrescente da topossequência sob muscovita-biotita-gnaiss, basalto, gabro no horizonte A e da topossequência sob basalto, muscovita-biotita-gnaiss, gabro nos horizontes B+C.

No horizonte A foi observado correlações negativas e significativas do Prem em ordem decrescente com Fe_2O_3 (raios X), Fed, SE e Feo e nos horizontes B+C com Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), Fe_2O_3 (raios X), argila, Fed e Feo.

Pela análise multivariada de componentes principais observou-se que os teores de P_{rem} e os atributos que representam a mineralogia dos solos dispostos de forma antagônica, evidenciando a capacidade dos óxidos de ferro e alumínio na adsorção específica de fósforo.

Pela análise de agrupamentos hierárquicos observou-se nos horizontes A três grupos, destacando os agrupamentos dos perfis de acordo com os materiais de origem, sendo exceção o T1P5 com os perfis sob gabra e nos horizontes B+C quatro grupos, com separação dos perfis T1P5 e T2P5 que apresentam horizontes C glei.

Agradecimentos

Ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, a Facultad de Ciencias da Universidad de Granada.

Referências

- ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Exchangeable aluminum evaluation in acid soils. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 543-548, 2003.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. *Os adubos e a eficiência das adubações*. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1991. p. 11-18. (Boletim técnico, 3).
- ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 985-1002, 2003.
- ALVAREZ V., V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 14, n. 1, p. 49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. *Boletim Informativo*, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27-33, 2000.

ALVES, M. E.; LAVORENTI, A. Remaining phosphorus and sodium fluoride pH in soils with different clay contents and clay mineralogies. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 3, p. 241-246, 2004.

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA E. S.; ALVAREZ V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1003-1011, 2003.

ANTELO, J.; ARCE, F.; AVENA, M.; FIOL, S.; LÓPEZ, R.; MACÍAS, F. Adsorption of soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. *Geoderma*, Amsterdam, v. 138, n. 1, p. 12-19, 2007.

BACHE, B. W.; WILLIAMS, E. G. A phosphate sorption index for soils. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 22, n. 3, p. 289-301, 1971.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 7, n. 1, p. 221-226, 1983.

BIGHAM, J. M.; GOLDEN, D. C.; BUOL, S. W.; WEED, S. B.; BOWEN, L. H. Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols: II. Influence on color, surface area, and phosphate retention. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 42, n. 5, p. 825-830, 1978.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I – trabalhos de laboratório. *Ceres*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 124-136, 1972.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clays Clay Minerals*, Urbana, v. 47, n. 4, p. 466-473, 1999.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of oxisols from the central plateau of Brazil. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 48, n. 4, p. 341-346, 1984.

DYAL, R. S.; HENDRICKS, S. B. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Science*, Philadelphia, v. 69, n. 6, p. 503-509, 1950.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T.; GUIMARÃES, M. F. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1009-1016, 2008.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.
- FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; SALTON, J. C.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F. Fósforo remanescente e correlação com as substâncias húmicas em um Latossolo Vermelho sob diferentes sucessões de cultura em plantio direto. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 14, n. 1, p. 161-166, 2008.
- FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, Amsterdam, v. 72, n. 1, p. 37-51, 1996.
- FROSSARD, E.; BROSSARD, M.; HEDLEY, M. J.; METHERELL, A. Reactions controlling the cycling of P in soils. In: TIESSEN, H. (Ed.). *P cycling in terrestrial and aquatic ecosystem; a global perspective*. New York: John Wiley, 1994. p. 1-65.
- GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J.; BORTOLON, L.; GONÇALVES, D. R. N. Relação entre óxidos de ferro e de manganês e a sorção de fósforo em solos no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1633-1639, 2011.
- HALLETT, R. B.; KYLE, P. R. XRF and INAA determinations of major and trace elements in geological survey of Japan igneous and sedimentary rock standards. *Geostandards Newsletter*, Malden, v. 17, n. 1, p. 127-133, 1993.
- HEILMAN, M. D.; CARTER, D. L.; GONZALEZ, C. L. The ethylene glycol monoethyl ether technique for determining soil surface area. *Soil Science*, Philadelphia, v. 100, n. 6, p. 409-413, 1965.
- JONES, R. C. X-ray diffraction line profile analysis vs. phosphorus sorption by 11 Puerto Rican soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 45, n. 4, p. 818-825, 1981.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5 M NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. *Clays Clay Minerals*, Urbana, v. 30, n. 6, p. 400-408, 1982.
- KARIM, M. I.; ADAMS, W. A. Relationships between sesquioxides, kaolinite, and phosphate sorption in a catena of Oxisols in Malawi. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 48, n. 2, p. 406-409, 1984.
- MARQUES, J. J.; TEIXEIRA, W. G.; SCHULZE, D. G.; CURI, N. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region. *Clay Minerals*, v. 37, n. 4, p. 651-661. 2002.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, Urbana, v. 7, n. 1, p. 317-327, 1960.
- MEURER, E. J.; RHEINHEIMER, D.; BISSANI, C. A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. (Ed.). *Fundamentos de química do solo*. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285 p.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 12, n. 2, p. 294-306, 1961.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soil and soil materials. *Advances in Agronomy*, v. 30, p. 1-50, 1978.
- ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do alto Paranaíba (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 953-964, 2004.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C. ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5. ed. Viçosa, MG: SBSC/EMBRAPA-CNPS, 2005. 100 p.
- SCHULZE, D. G. The influence of aluminum on iron oxides. VII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays Clay Minerals*, Urbana, v. 32, n. 1, p. 27-39, 1984.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch photochemische Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, v. 105, n. 1, p. 194-202, 1964.
- SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.
- SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.
- SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. New York: Oxford University Press, 1989. 277 p.
- TORRENT, J. Interactions between phosphate and iron oxide. *Advanced Geoecology*, v. 30, p. 321-344, 1997.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials. *Clays Clay Minerals*, Urbana, v. 40, n. 1, p. 14-21, 1992.

_____. Phosphate sorption by natural hematites. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 45, n. 1, p. 45-51, 1994.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. *Bragantia*, Campinas, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

VILAR, C. C.; COSTA, A. C. S.; HOEPERS, A.; SOUZA JUNIOR, I. G. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1059-1068, 2010.