

ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE ARGILA DE ATIVIDADE BAIXA⁽¹⁾

GUSTAVO SOUZA VALLADARES⁽²⁾; MARCOS GERVASIO PEREIRA⁽³⁾;
LÚCIA HELENA CUNHA DOS ANJOS⁽³⁾

RESUMO

Neste estudo foram avaliadas possíveis correlações entre atributos físicos e químicos do solo e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) em solos com argila de atividade baixa de diferentes regiões do Brasil, sendo utilizadas amostras de horizontes superficiais (A) e subsuperficiais (B) de 16 perfis de solos. As doses para a determinação da CMAP foram calculadas com base no teor de fósforo remanescente e variaram de 0 a 135 mg.L⁻¹. A partir dos dados obtidos foram então construídas isotermas de adsorção de Langmuir. Foram feitas correlações entre CMAP e os teores de argila, de carbono orgânico, ki, kr, superfície específica, teor de alumínio determinado por ataque sulfúrico e teores das diferentes formas de ferro extraível. Foi observada grande variação nos valores de CMAP para o horizonte superficial (48 a 1429 mg.kg⁻¹) e para o horizonte subsuperficial (455 e 1.667 mg.kg⁻¹). Os coeficientes de correlação demonstraram haver uma associação significativa entre a CMAP e o teor de argila dos solos, ferro e alumínio, determinados pelo ataque sulfúrico e ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato (DCB). A análise de regressão múltipla mostrou bom ajuste aos valores da CMAP com base em atributos dos solos estudados.

Palavras-chave: fosfato, solos tropicais, equação de Langmuir.

ABSTRACT

PHOSPHATE SORPTION IN LOW ACTIVITY CLAY SOILS

In this study possible correlations between physical and chemical properties and the maximum phosphorus adsorption capacity (MAPC) were evaluated in soils with low activity clay from different regions of Brazil, using samples from the surface (A) and subsurface (B) horizons of 16 soil profiles. The dosages for the determination of MAPC were calculated from the level of remaining phosphorus and they ranged from 0 to 135 mg L⁻¹. From this data isotherms of P adsorption were built. Correlations were tested between MAPC and the clay content, organic carbon, ki, kr, specific surface, Al content determined by sulfuric acid attack, and content of different forms of extracted iron. A high variation in the values of MAPC for the surface horizon (48 to 1429 mg kg⁻¹) and for the subsurface horizon (455 to 1667 mg kg⁻¹) was observed. The correlation coefficients showed a significant association between MAPC and clay content, iron and aluminium determined by sulfuric acid attack and iron extracted by dithionite-citrate-bicarbonate (DCB). The multiple regression analysis showed a good fit to MAPC values based in soil attributes.

Key words: phosphate, tropical soils, Langmuir equation.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor para conclusão do CPGA-CD, UFRRJ. Recebido para publicação em dezembro de 2001 e aceito em 23 de janeiro de 2003. Projeto E-26/150.732/99, financiado pela FAPERJ.

⁽²⁾ Embrapa Monitoramento por Satélite, Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803, Parque São Quirino, 13088-300 Campinas (SP).

⁽³⁾ Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, 23890-000 Seropédica (RJ).

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos solos brasileiros são intemperizados e apresentam óxidos de ferro e alumínio e argilas do grupo da caulinita como principais constituintes da fração argila, minerais caracterizados pela presença de cargas de superfície variáveis segundo a reação da solução do solo (VOLKSWEISS e RAIJ, 1977).

Nas condições de reação ácida a moderadamente ácida os óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, predomínio de íons fosfatos. Nos óxidos e na caulinita também ocorre adsorção específica de fosfato nos sítios ácidos de Lewis (KAMPATH, 1977; VOLKSWEISS e RAIJ, 1977; HEDLEY et al., 1990; NOVAIS et al., 1991).

Vários são os atributos do solo que podem influenciar a adsorção de fósforo, sendo os principais: o tipo e teor de argila, de colóides amorfos e de matéria orgânica (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Estudos têm relacionado a capacidade de adsorção de fósforo dos solos com o teor de argila e superfície específica (LEAL e VELLOSO, 1973; JUO e FOX, 1977), porém segundo BAHIA FILHO (1982) e KER (1995), pouca ênfase tem sido dada ao conhecimento da natureza da fração argila e da composição mineralógica na capacidade de adsorção de fósforo.

O papel desempenhado pela matéria orgânica é ambivalente, já que ela tanto pode adsorver o fósforo como também bloquear os sítios de adsorção que ocorrem nas superfícies das argilas e dos óxidos de ferro e alumínio (SANYAL e DE DATTA, 1991). Quanto à mineralogia e características de cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio, vários estudos têm mostrado que a capacidade de adsorção de fósforo parece estar relacionada com a área superficial do óxido (FONTES e WEED, 1996) e com o seu grau de cristalinidade. HERNÁNDEZ e MEURER (1998), estudando solos do Uruguai, verificaram que a adsorção de fósforo apresentou correlação positiva com as formas de ferro de baixa cristalinidade (Feo), sugerindo que tal variável pode ser utilizada para estimar a adsorção de P.

As isotermas de adsorção descrevem as relações de equilíbrio entre a quantidade de um elemento adsorvido e a quantidade remanescente na solução final, sendo úteis para quantificar a adsorção de íons no solo (OLSEN e WATANABE, 1957; ALLEONI, 1996; NOVAIS e SMYTH, 1999). Dentre os modelos de isotermas mais utilizados destaca-se a de Langmuir, que permite a estimativa da capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) pelo solo (CUNHA et al., 1994; PEIREIRA 1996; NOVAIS e SMYTH, 1999).

Este estudo teve como objetivo avaliar possíveis correlações entre atributos físicos e químicos e a CMAP, em solos com argila de atividade baixa provenientes de diferentes regiões do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados materiais provenientes de amostras de horizontes superficial (A) e subsuperficial (B) de dezesseis perfis de solos, provenientes de diferentes regiões do Brasil (Quadro 1), escolhidos por apresentarem variação no material de origem, e expressão das Ordens de solos ocorrentes no Brasil.

Todos os perfis utilizados fazem parte da coleção de solos da EMBRAPA/CNPS, tendo sido descritos e coletados segundo as normas preconizadas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (LEMO e SANTOS, 1982). Para a caracterização analítica dos perfis de solo foram realizadas entre outras análises a determinação do carbono orgânico, ataque sulfúrico (Als e Fes) e cálculo dos índices k_i e k_r , de acordo com os métodos da EMBRAPA/SNLCS (1979).

A superfície específica da argila foi determinada, pelo método etileno glicol monoetil éter, segundo CARTER et al. (1965), HEILMAN et al. (1965) e com modificações de CIHACEK e BREMMER (1979).

Os teores de ferro extraível na fração terra fina foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, após extração com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), Fed, segundo o método de MEHRA e JACKSON (1960), modificado por SCHULZE (1984) e com solução de oxalato ácido de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ (SCHWERTMANN, 1966), Feo.

O fósforo remanescente (Prem) foi determinado segundo ALVAREZ V. e FONSECA (1990). O volume de 5 cm^3 de terra fina foi colocado em contato por uma hora com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$, contendo 50 mg.L^{-1} de fósforo. Após a agitação, separaram-se as fases sólida e líquida, e na solução de equilíbrio foi determinada a concentração de P, utilizando-se o método do ácido ascórbico, modificado por BRAGA e DEFELIPO (1972).

As doses para a determinação da CMAP foram calculadas com base no teor de Prem (ALVAREZ V. e FONSECA, 1990) e variaram de 0 a 135 mg.L^{-1} . Os pontos para ajuste da isoterma de Langmuir foram obtidos adicionando-se 25 mL de solução de CaCl_2 10 mmol.L^{-1} , contendo P nas doses indicadas, a amostras de $2,5 \text{ g}$ de terra fina seca ao ar. Após 24 horas de agitação, as amostras foram centrifugadas e o fósforo na solução de equilíbrio, quantificado por colorimetria (BRAGA e DEFELIPO, 1972).

Quadro 1. Classificação, localização e resultados de análises químicas e físicas dos perfis utilizados

Perfil (¹)	Localização	Horizonte	C org.	Argila	Fes			Valor T	Se	ki	kr
					g.kg ⁻¹						
Material de origem - Rochas Ácidas											
LAW1	Juiz de Fora, MG	A	46,2	540	87	1,87	41	21,8	236	0,73	0,54
		Bw	5,2	700	106	0,35	54	5,3	126	0,78	0,57
LAd1	Campina Grande do Sul, PR	A	47,7	470	53	6,69	33	20,3	258	2,04	1,60
		Bw	4,0	500	73	1,05	46	4,1	204	1,84	1,43
LVd1	Pouso Alegre, MG	A	16,2	650	90	1,68	43	6,1	188	1,25	0,93
		Bw	7,2	700	91	1,64	64	3,5	181	1,31	0,97
LAd2	Juiz de Fora, MG	A	23,3	450	44	1,20	22	11,4	131	1,74	1,38
		Bw	3,2	520	52	0,44	28	4,0	98	1,64	1,31
CXbd1	São José dos Pinhais, PR	A	37,1	410	32	5,68	22	21,2	240	1,66	1,38
		Bi	4,1	480	33	0,52	23	7,0	134	1,82	1,58
Material de origem - Rochas Básicas ou Alcalinas											
PAd1	Caldas, MG	A	19,0	650	48	1,77	29	10,1	229	1,76	1,51
		Bt	6,2	750	50	1,44	26	5,8	146	1,68	1,45
LBd1	Pitanga, PR	A	34,1	810	150	1,93	107	17,1	338	1,28	0,84
		Bw	3,6	830	161	1,92	118	4,3	91	1,36	0,90
LBd2	Guarapuava, PR	A	25	760	148	1,93	93	18,8	302	1,56	0,97
		Bw	3,6	780	155	1,75	103	5,1	200	1,59	1,02
LVef1	Londrina, PR	A	23,8	830	216	2,17	95	17,1	234	1,54	0,88
		Bw	4,2	820	207	4,92	114	5,3	27	1,43	0,85
PAd2	Água Doce, SC	A	41,8	760	140	2,15	79	19,7	372	2,02	1,24
		Bt	6,4	770	173	1,79	109	7,3	80	2,31	1,35
LBd3	Campos Novos, SC	A	29,7	770	131	1,97	96	17,2	272	1,73	1,13
		Bw	5,8	860	146	1,98	95	5,2	60	1,87	1,19
Material de origem - Rochas Sedimentares ou Sedimentos											
LVd2	Artur Nogueira, SP	A	14,7	540	71	1,70	55	7,3	121	1,32	0,96
		Bw	3,9	590	78	1,39	60	2,4	32	1,23	0,91
LVd3	Assis, SP	A	7,3	170	17	0,64	13	3,9	51	2,21	1,72
		Bw	1,0	240	24	0,32	20	1,3	168	1,85	1,49
PVd1	Porto Esperidião, MT	A	19,1	320	38	1,50	28	7,0	86	1,84	1,36
		Bt	3,1	590	63	1,66	51	2,1	204	1,64	1,26
PVd2	Brasiléia, AC	A	5,9	60	15	0,42	8	3,6	24	2,55	1,64
		Bt	3,9	340	39	0,63	29	4,1	139	1,88	1,43
PAd3	Capanema, PA	A	8,6	60	4	0,53	3	4,1	33	2,37	2,12
		Bt	1,9	220	10	0,45	7	2,2	300	2,01	1,83

(¹) LAW = LATOSSOLO AMARELO Ácrico; LAd = LATOSSOLO AMARELO Distrófico; LVd = LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, CXbd = CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico, PAd= ARGISSOLO AMARELO Distrófico, LBd= LATOSSOLO BRUNO Distrófico, LVef = LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico e PVd = ARGISSOLO VERMELHO Distrófico (EMBRAPA/CNPS, 1999).

Fes: Fe determinado por ataque sulfúrico; Fed: Fe extraído por ditionito-citrato bicarbonato; Feo: Fe extraído por oxalato; Se: Superfície específica. ki = (SiO₂/Al₂O₃) ; kr = (SiO₂ x 1,7) / (Al₂O₃+Fe₂O₃).

Com os dados obtidos, foram construídas isotermas de adsorção com duas regiões (CURI et al., 1988) utilizando-se a equação

$$x/m = (b^I - (x/m)^I / k^I c) + (b^{II} - (x/m)^{II} / k^{II} c),$$

sendo: I e II regiões de sítios de adsorção; b = adsorção máxima em μg de P/g de solo; k = constante relacionada à energia de ligação; c = concentração de equilíbrio de P em $\mu\text{g}/\text{mL}$; e x/m = teor de P adsorvido por unidade de massa de solo ($\mu\text{g}/\text{g}$). A CMAP foi estimada a partir dos dados da segunda região da isoterma de Langmuir e foram feitas correlações simples de Pearson entre a CMAP e os teores de argila, carbono orgânico, ki, kr, valor T, superfície específica, teor de Al extraído por ataque sulfúrico e as diferentes formas de ferro extraíveis.

Foram efetuadas análises estatísticas de regressão múltipla (NETER et al., 1990) utilizando-se a CMAP como variável dependente. Para o horizonte A foi utilizado o método de "backward stepwise" para a seleção das variáveis independentes do modelo, e para o ho-

rizonte B a seleção das variáveis independentes se deu pelo método de regressão "best-subset" (STATSOFT, 1999).

A diferença entre os dois métodos de seleção das variáveis independentes foi necessária, para a obtenção de modelos mais adequados na estimação da CMAP. As variáveis selecionadas para compor os modelos foram baseadas no nível de significância dos coeficientes parciais da regressão a 10% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de Prem apresentaram ampla variação para os horizontes estudados, sendo os menores valores verificados nos horizontes subsuperficiais (Quadro 2). Para os horizontes superficiais, os valores de Prem situaram-se entre 20,0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (perfil LBd1) e 40,8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (perfil PAd3).

Quadro 2. Fósforo remanescente (Prem) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) dos solos estudados.

Perfil	Prem		CMAP	
	Horizonte		Horizonte	
	A	B	A	B
	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
Material de origem - Rochas ácidas				
LAW1	34,5	17,5	1.429 ^{n.s.}	1250
LAd1	34,5	11,8	714 ^{n.s.}	1250
LVd1	26,4	20,0	667	556
LAd2	33,3	16,1	3.333 ^{n.s.}	625
CXbd1	25,3	20,5	588	714
Material de origem - Rochas básicas ou alcalinas				
PAd1	23,7	13,2	625	1667
LBd1	20,0	7,8	1.429	1667
LBd2	21,0	12,3	769	1429
LVef1	34,5	17,0	526	1250
PAd2	24,2	13,2	2.500 ^{n.s.}	1429
LBd3	22,1	17,0	667	1429
Material de origem - Rochas sedimentares ou sedimentos				
LVd2	29,7	20,0	625	500
LVd3	35,7	28,6	625 ^{n.s.}	455
PVd1	37,0	25,8	192	714
PVd2	25,3	20,5	48	312 ^{n.s.}
PAd3	40,8	35,7	1429 ^{n.s.}	417

n.s.: Coeficiente angular da análise de regressão linear simples não significativo, a 10% de probabilidade.

Para o horizonte subsuperficial, os valores variaram entre 7,8 (perfil LBd1) e 35,7 mg.L⁻¹ (perfil PAd3). Os valores da CMAP (Quadro 2) oscilaram entre 48 e 1429 mg.kg⁻¹ no horizonte superficial e 455 a 1.667 mg.kg⁻¹ para o horizonte subsuperficial. Os solos originários de basalto (LBd1, LBd2, LVef1, PAd2 e LBd3) apresentaram bons ajustes pelo emprego da isoterma de Langmuir, exceto o horizonte A do perfil PAd2. Os valores médios de CMAP oscilaram entre 848 (horizontes superficiais) e 1.479 mg.kg⁻¹ (horizontes subsuperficiais). Na análise conjunta de todos os perfis, os horizontes superficiais apresentaram CMAP média de 614 mg.kg⁻¹ e os subsuperficiais de 1023 mg.kg⁻¹.

Esses valores são menores que as médias da CMAP para solos originados de basalto; solos formados a partir desse material de origem possuem maior CMAP, quando comparados aos demais. Os teores de argila mais elevados e a maior ocorrência de óxidos como hematita e goethita, em solos formados a partir deste material, podem ser as possíveis explicações para uma maior adsorção. CURI et al. (1988), estudando a sorção de fósforo em materiais do horizonte Bw de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul, verificaram ampla variação na adsorção de P, ou seja, valores de 495 até 3.400 mg.kg⁻¹ de solo.

Naquele trabalho, os maiores valores de adsorção de fósforo, classe alta de adsorção (CMAP >2.500 mg.kg⁻¹) foram constatados nos solos com teores de Fe₂O₃ superiores a 24%, tendo como material de origem rochas de caráter básico ou itabiritos. Dentre os horizontes superficiais, o horizonte Ap do perfil LBd1 foi o que apresentou o maior valor de CMAP, o que parece estar relacionado à textura muito argilosa (810 g.kg⁻¹) e ao elevado teor de carbono orgânico (34,1 g.kg⁻¹) deste horizonte, o que pode estar favorecendo uma maior taxa de adsorção de fósforo. Este comportamento corrobora diversos trabalhos (SINGH e GILKES, 1991; MOUGHLI et al., 1993; BOSCHETTI et al., 1998) e demonstra que o teor de argila parece ser um dos principais fatores envolvidos na adsorção de fósforo.

O menor valor de CMAP (48 mg.kg⁻¹), no horizonte superficial, foi verificado no perfil PVd2, que possui teor de argila igual a 60 g.kg⁻¹ (Quadro 1) e como material originário de sedimentos argilo-arenosos, demonstrando a influência da textura na dinâmica de adsorção do fósforo.

Dentre os horizontes subsuperficiais, os perfis PAd1 e LBd1 foram os que apresentaram maiores valores de CMAP (1.667 mg.kg⁻¹) quando comparados aos demais, mostrando alta CMAP em solos originários de rochas básicas ou alcalinas; no perfil PAd3, de textura média, verificou-se o menor valor de CMAP (417 mg.kg⁻¹), mostrando que solos com menores teores de argila apresentam menores CMAP.

Com exceção do perfil PVd2, onde não foi significativo o coeficiente angular da regressão linear a 5% de probabilidade (Quadro 2), os resultados encontrados indicam que a isoterma de Langmuir apresentou melhor ajuste aos dados de adsorção de fósforo para os horizontes subsuperficiais, quando comparado aos horizontes superficiais. Não foram significativas a 5% de probabilidade as regressões para os horizontes superficiais dos perfis LAw1, LAd1, LAd2, PAd2, LVd3 e PAd3.

Os coeficientes de correlação de alguns atributos dos solos com a CMAP (Quadro 3) foram positivos e significativos a 1% ou a 5% de probabilidade no horizonte superficial para o teor de carbono orgânico, superfície específica e teor de argila, sugerindo que para esses horizontes, tais atributos contribuem com elevação da capacidade máxima de adsorção de fósforo, sendo este comportamento também verificado em outros trabalhos (SANYAL e DE DATTA, 1991; CAMPELLO et al., 1994; BOSCHETTI et al., 1998).

Nos horizontes superficiais também foram encontradas correlações entre a CMAP e os teores de Als (r=0,74, significativo a 5% de probabilidade) e Fed (r=0,70, significativo a 5% de probabilidade), indicando que nesses horizontes estas formas contribuem no processo de adsorção de fósforo.

Comportamento similar foi verificado por PEREIRA (1996) que, estudando a capacidade de adsorção de fósforo em perfis originados a partir de diferentes materiais, verificou, para os horizontes superficiais, correlação entre a CMAP e as diferentes formas de ferro (Fes, Fed e Feo). Para os horizontes subsuperficiais, não se constatou correlação entre a CMAP e o teor de carbono orgânico. É possível que a correlação não significativa nesse horizonte seja função dos seus baixos teores da fração orgânica.

Nos horizontes subsuperficiais, foram observadas correlações positivas e significativas a 1% ou 5% de probabilidade entre a CMAP e o teor de argila, superfície específica da argila e teores de Als e Fed. O maior teor de argila está relacionado a um maior número de sítios ácidos de Lewis que em solos intemperizados favorecem a adsorção de fosfato (NOVAIS e SMYTH, 1999). Esse comportamento coincide com os resultados de outros estudos em que foram verificadas correlações positivas e significativas entre estes atributos (LEAL e VELLOSO, 1973; ALMEIDA, 1979; LOPES e COX, 1979; PEÑA e TORRENT, 1984; PEREIRA, 1996).

Há correlação positiva entre Fed e CMAP nos horizontes superficiais e subsuperficiais (Quadro 3), enquanto para Fes, somente nos horizontes B. A ausência de correlação significativa com as formas de baixa cristalinidade (Feo) deve ser resultado dos baixos teores de ferro nessa forma nos solos estudados.

Quadro 3. Coeficiente de correlação simples entre CMAP e alguns atributos dos solos estudados

Variável	Coeficiente de correlação simples	
	Horizonte A	Horizonte B
Argila	0,75*	0,77**
Carbono	0,65*	0,22 ^{n.s.}
Als	0,74*	0,80**
Fes	0,44 ^{n.s.}	0,53*
Fed	0,70*	0,63*
Feo	0,20 ^{n.s.}	0,41 ^{n.s.}
ki	-0,74*	-0,001 ^{n.s.}
kr	-0,67*	-0,30 ^{n.s.}
Se	0,84**	0,79**

Feo- Fe extraído com oxalato de amônio; Fed- Fe extraído com DCB; Fes- Fe determinado por ataque sulfúrico; Als- Al determinado por ataque sulfúrico; Se-superfície específica.

* - significativo a 5% de probabilidade;** - significativo a 1% de probabilidade; n.s. - não significativo.

Na literatura observa-se que a forma extraível Feo parece contribuir efetivamente no processo de sorção de P (UDO e UZU, 1972; JUO e FOX, 1977, HERNÁNDEZ e MEURER, 1998). A grande diversidade de características dos materiais de origem também pode estar interferindo na falta de correlação de Feo com a CMAP.

Os índices de intemperismo ou pedogênese ki e kr apresentaram correlação negativa com a CMAP (Quadro 3), sendo significativas tais correlações apenas para os horizontes superficiais. Apesar de vários estudos (LEAL e VELLOSO, 1973; SINGH e GILKES, 1991; PEREIRA, 1996) constatarem que quanto maior o caráter oxidico do solo maior será sua CMAP, tal comportamento não foi observado nos solos estudados, em especial para o horizonte B. A pequena faixa de variação dos valores de ki e kr verificada neste horizonte parece explicar a ausência de correlação entre a CMAP e esses atributos.

Nos horizontes superficiais, a análise de regressão linear múltipla para a CMAP como variável dependente e as variáveis independentes, selecionadas pelo método “*backward stepwise*”, carbono, argila, Fes, Fed, Se, ki e kr, apresentou ótimo ajuste ao modelo, representado pelo elevado coeficiente de determinação ($r^2=0,9995$) (Figura 1a), mostrando a pequena dispersão dos resultados da CMAP encontrados no laboratório pelo ajuste da isoterma de Langmuir e os resultados estimados pela regressão múltipla da equação 1, apresentada abaixo:

$$\text{CMAP} = 2114,5 + (-487,6\text{carb}) + (-4,0\text{arg}) + (3,5\text{Fes}) + (16,2\text{Fed}) + (8,7\text{Se}) + (-2069,3\text{ki}) + (2042,6\text{kr})$$

$$r^2 = 0,999, p < 0,16\% \text{ [eq.1]}$$

O coeficiente linear da equação acima (2.114,5) foi significativo ao nível de 0,11% de probabilidade, e o nível significância dos coeficientes angulares parciais foram, respectivamente, 0,14%, 0,11%, 0,25%, 0,21%, 0,09%, 0,12% e 0,26% de probabilidade. Portanto, o modelo ajustou-se bem aos valores da CMAP para os solos estudados.

A variável Als apesar da alta correlação com a CMAP não foi incluída no modelo, devido aos altos problemas de multicolinearidade com as demais variáveis. Como apresentado na Figura 1a somente os valores de CMAP para o perfil LbD2 tiveram grande diferença, da ordem de 59,4%.

O ajuste do modelo para o horizonte subsuperficial baseou-se na seleção das variáveis independentes pelo método “*best-subset*”, que selecionou as variáveis Als, Fed e kr, apresentando um bom ajuste, porém inferior ao do modelo para os horizontes superficiais, apresentando $r^2=0,782$.

A dispersão das estimativas dos valores da CMAP encontrados pelos diferentes métodos foi baixa como apresenta a Figura 1b. A equação 2 representa o modelo de regressão múltipla dos horizontes subsuperficiais.

$$\text{CMAP} = -1471,7 + (66,9\text{Als}) + (4,5\text{Fed}) + (640,5\text{kr})$$

$$r^2 = 0,782, p < 0,059\% \text{ [eq.2]}$$

O coeficiente linear da equação acima (-1.471,7) foi significativo ao nível de 2,37% de probabilidade, e o nível significância dos coeficientes angulares parciais foram, respectivamente, 0,12%, 9,14% e 3,41% de probabilidade. O modelo acima também mostrou bom ajuste aos valores da CMAP.

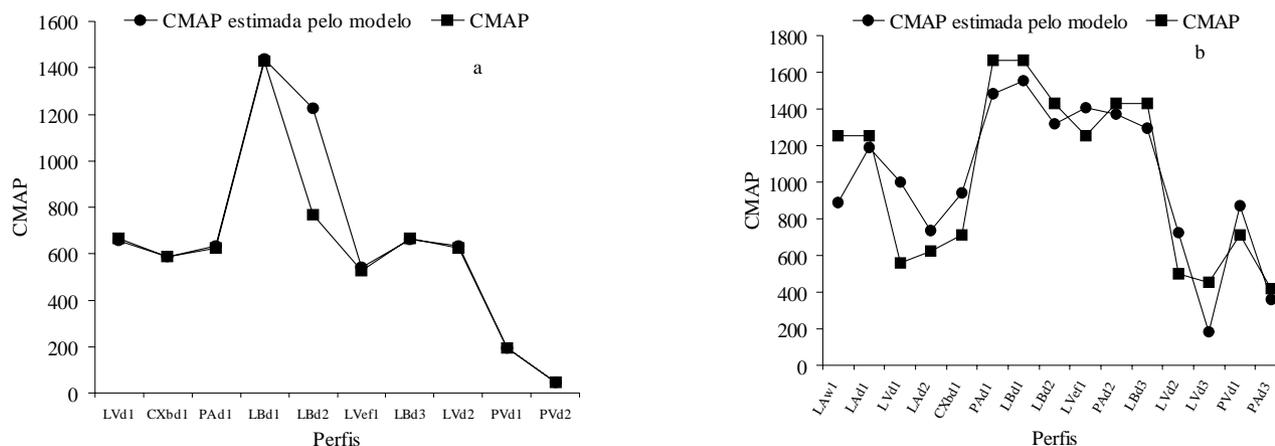


Figura 1. Capacidade máxima de adsorção de fósforo obtida pela isoterma de Langmuir (CMAP) e estimada pelo modelo de regressão linear múltipla, para os horizontes superficiais (a) e subsuperficiais (b).

4. CONCLUSÕES

1. Os solos de textura mais argilosa apresentaram maior capacidade de adsorção de fósforo, com destaque para os formados a partir de rochas básicas ou alcalinas

2. Os atributos dos solos que mostraram maior correlação com a CMAP são em ordem decrescente de associação:

Horizonte A – Se>argila>Als, ki >Fed>kr>carbono; e
Horizonte B – Als>Se>argila>Fed>Fes.

Pela análise de regressão múltipla, porém, as variáveis independentes selecionadas pelo modelo para os horizontes superficiais A foram: carbono, argila, Fes, Fed, Se, ki e kr; para os horizontes subsuperficiais B foram Als, Fed e kr. Os modelos mostraram bom ajuste aos valores da CMAP.

3. Os teores de Fe e Al obtidos após ataque sulfúrico e os teores de Fe extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato foram os que melhor se correlacionaram com a CMAP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L.R.F. *Adsorção de boro em Podzólico e Latossolos paulistas*. 1996. 127f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

ALMEIDA, D.L. *Avaliação de métodos de determinação de fósforo disponível em solos do Estado do Rio de Janeiro*. 1979. 62f. Tese (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí.

ALVARÉZ 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, p.49-55, 1990.

BAHIA FILHO, A.F.C. *Índices de disponibilidade de fósforo em latossolo de planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas*. 1982. 179f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa.

BOSCHETTI, A.N.G.; QUINTERO, G.C.E.; BENAVIDEZ, Q.R.A. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.22, p.95-99, 1998.

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, p.124-136, 1972.

CAMPELLO, M.R.; NOVAIS, R.F.; FERNANDEZ, R.I.E.; FONTES, M.P.F.; BARROS, N.F. Avaliação da reversibilidade de fósforo não lábil para lábil em solos com diferentes características. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, p. 157-165, 1994.

CARTER, D.L.; HEILMAN, M.D.; GONZALES, C.L. Ethylene glycol monoethyl ether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Science*, Baltimore, v.100, p.356-360, 1965.

CIHACEK, L.J.; BREMNER, J.M. A simplified ethylene glycol monoethyl ether procedure for assessment of soil surface area. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.43, p.821-822, 1979.

CUNHA, R.C.A.; CAMARGO, O.A.; KINJO, T. Aplicação de três isotermas na adsorção de zinco em oxissolos, alfissolos e ultissolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, p.15-20, 1994.

- CURI, N.; CAMARGO, O.A.; GUEDES, G.A.A.; SILVEIRA, J.V. Sorção de fósforo em materiais de Latossolos do Brasil Sudeste e Sul. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988. *Anais...* Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1988. p.267-282.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. paginação irregular.
- 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, p.37-51. 1996.
- HEDLEY, M.J.; HUSSIN, A.; BOLAN, M.S. New approaches to phosphorus fertilization. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1, 1990, Los Banos. *Proceedings...* Manila: IRRI, 1990. p.125-142.
- HEILMAN, M.D.; CARTER, D.L., GONZALEZ, C.L. The ethylene glycol monethyl ether (EGME) technique for determining soil surface area. *Soil Science*, Baltimore, v.100, p.409-413, 1965.
- HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.22, p.223-230, 1998.
- JUO, A.S.R.; FOX, R.L. Phosphate sorption characteristics of some bech-mark soils of west Africa. *Soil Science*, Baltimore, v.124, p.370-376, 1977.
- KER, J. C. *Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil*. Viçosa, 1995. 181p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa.
- KAMPRATH, E. J. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soil. In: FERRI, M. G. (Coord.). SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1977, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p.333-347.
- LEAL, J.R.; VELLOSO, A.C.X. Desorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado. II. Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução em equilíbrio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.8, p.89-92, 1973.
- LEMO, R. C.; SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solos no campo*. 2.ed. Campinas, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1982. 42p.
- MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, Washington, D.C., v.5, p.317-327, 1960.
- MOUGHLI, L.; WESTFALL, D. G.; ALI BOUKHIAL. Use of adsorption and buffer capacity in soil testing for phosphorus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.24, p.1959-1974, 1993.
- LOPES, A.S.; COX, F.R. Relação de características físicas químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob Cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.3, p.82-88, 1979.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M.H. *Applied linear statistical models: regression, analysis of variance, and experimental designs*. 3.ed. Boston: IRWIN, 1990. 1181p.
- NETTO, A. R. *Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros*. 1996. 144f. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa.
- NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Aspectos físico-químicos envolvidos na fixação do fósforo no solo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5., 1991. São Paulo. *Anais...* São Paulo: 1991. p. 133-177.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.21, p.144-149, 1957.
- PEÑA, F.; TORRENT, J. Relationships between phosphate sorption and iron oxides in Alfisols from a river terrace of Mediterranean Spain. *Geoderma*, Amsterdam, v.33, p.283-296, 1984.
- PEREIRA, M.G. *Formas de Fe, Al e Mn como índices de pedogênese e adsorção de fósforo em solos do Estado do Rio de Janeiro*. 1996. 211p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advances in Soil Science*, New York, v.16, p.1-120, 1991.
- SCWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. *Nature*, Paris, v.212, p.645-646, 1966.
- SCHULZE, D.G. The influence of aluminium on iron oxides. VII. Unit-cell dimensions of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. *Clays Clay Minerals*, v.1, p.27-39, 1984.
- SINGH, B.; GILKES, R. J. Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of South-western Australia. *Australian Journal of Soil Research*, East Melbourne, v.29 p. 603 – 618, 1991.
- STATSOFT, INC. (1999). *Electronic Statistics Textbook*. Tulsa: StatSoft. Disponível em: <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>.
- VOLKSWEISS, S.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: FERRI, M. G., (Coord.) SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 1977, Belo Horizonte. *Anais...* São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p. 317-332.
- UDO, E. J.; UZU, F. O. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils. *Soil Science American Proceedings*, Madison, v.36, p.879-883, 1972.