

## **Efeito do agrosilício e calcário na disponibilidade de fósforo em Argissolo e Latossolo**

Ramara Sena de Souza; Lúcia Helena Garófalo Chaves

Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Departamento de Engenharia Agrícola, Avenida Aprígio Veloso, 882, CEP: 58429-140. Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: ramarasena2005@yahoo.com, lhgarofalo@hotmail.com,

**Resumo:** A adsorção é um dos processos responsável pelo acúmulo de fósforo na superfície dos colóides do solo. Amostras da camada arável de Argissolo e Latossolo do Estado da Paraíba foram utilizadas para avaliar o efeito de agrosilício e de calcário sobre correção da acidez de solos, e o efeito destes corretivos na disponibilidade de fósforo nos solos. Os solos foram incubados com cinco doses dos corretivos, correspondentes as quantidades necessárias para elevar a saturação por bases do solo de 50 a 90%. Para adsorção de fósforo, amostras dos solos foram agitadas por 1 hora, com soluções de 6; 12; 18; 30; 54; 78; 102 e 114 mg L<sup>-1</sup> de P as quais foram calculadas com base no P-rem. O fósforo foi analisado no sobrenadante para a determinação da quantidade adsorvida; os valores de adsorção foram ajustados à isoterma de Langmuir. Avaliou-se a energia livre e o fator de separação de adsorção de fósforo em amostras. O agrosilício apresentou eficiência igual ou maior ao calcário, na correção da acidez dos solos. O modelo de Langmuir descreveu satisfatoriamente a adsorção do fósforo para os solos estudados, apresentando maior afinidade pelo Argissolo. O fósforo foi adsorvido pelos solos por reações energeticamente favoráveis e espontâneas e influenciado pela matéria orgânica, acidez e teor de argila dos solos. A energia livre de adsorção de fósforo diminuiu com o aumento de fósforo adicionado. A disponibilidade de fósforo em amostras de Argissolo foi semelhante tanto com a aplicação de calcário como de agrosilício. Nas amostras de Latossolo foi melhor com a aplicação de agrosilício.

**Palavras chave:** Isoterma de Langmuir, termodinâmica,

### **Phosphorus availability by silicate and limestone in acid soils**

**Abstract:** The adsorption is one of the processes responsible for the accumulation of phosphorus on the surface of soil colloids. Topsoil samples from Ultisol and Oxisol of the Paraíba State, Brazil, were used to evaluate the effect of silicate (agrosilício) and lime on soil acidity correction and corrective effect on the availability of phosphorus in soils. Soils were incubated with five doses of these correctives corresponding to the quantities necessary to raise the base saturation of the soil from 50 to 90%. For phosphorus adsorption, soil samples were stirred for 1 hour with solutions containing 6, 12, 18, 30, 54, 78, 102 and 114 mg L<sup>-1</sup> of P which were calculated based on the P-rem. The phosphorus in the supernatant was analysed to determine the amount adsorbed; adsorption values were adjusted to the Langmuir isotherm. The free energy and the separation factor adsorption of phosphorus in samples were evaluated. The silicate (agrosilício) presented efficiency equal to or greater than limestone in liming of soils. The Langmuir model described satisfactorily the adsorption of phosphorus in soils, with higher affinity for the Ultisol. The phosphorus was adsorbed by soil by energetically favorable reactions and spontaneous and influenced by organic matter, acidity and clay content of the soil. The free energy of adsorption of phosphorus decreased with increase in added phosphorus. The availability of phosphorus in Ultisol was similar with application of lime or agrosilício, while in Oxisol it was high in case of application of silicate (agrosilício).

**Key words:** Langmuir isotherm, thermodynamics,

## Introdução

Os solos na região semiárida do Nordeste Brasileiro, em geral, são pobres em fósforo provavelmente, devido o material de origem e/ou a forte interação do fosfato com o solo, como fixação, sorção ou adsorção de fósforo (CORRÊA et al., 2004). Este último processo, ou seja, a adsorção de fósforo pelos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio é um dos principais fatores envolvidos na insolubilização desse nutriente em solos tropicais. Nos grupos OH expostos em minerais de argila, que apresenta alta afinidade pelo fósforo, também ocorre reações de adsorção de fosfato. O íon fosfato reage rapidamente com o octaedro de Al, pela substituição dos grupos OH localizados na superfície do mineral, formando complexos de esfera interna. Ocorrem, também, reações de precipitação do fósforo com formas iônicas de Al e Fe em solos ácidos e Ca em meio básico, formando compostos de baixa solubilidade (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A extensão ou a força que guia estas reações acima citadas é medida através das mudanças na energia livre ( $\Delta G_0$ ) que ocorrem quando um elemento é adsorvido. Seu sinal indica se a reação é espontânea ou não, em um sistema fechado, à temperatura e pressão constantes. Quanto maior a magnitude do valor de energia livre (negativa) maior a força de reação de determinado soluto pela superfície adsorvente (SOARES et al., 2005).

Um dos fatores que interfere na adsorção do fósforo é a reação do solo. Por exemplo, o aumento do pH, devido a aplicação de corretivos em solos ácidos, reduz a adsorção de fósforo. Isto porque, a elevação do pH do solo, aumentando a concentração e atividade dos íons  $\text{OH}^-$  em solução, promove a precipitação de Fe e Al, reduzindo a precipitação de P-Fe e P-Al de baixa solubilidade; há, também, geração de cargas negativas nas argilas e matéria orgânica, ocorrendo repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente, aumentando, por isso, a disponibilidade de fósforo na solução do solo e a retenção de cátions (ERNANI et al., 2000).

Os materiais mais utilizados para corrigir a acidez do solo são os calcários. De acordo com

Souza et al. (2006), a aplicação de calcário em diversos tipos de solos brasileiros, promoveu a redução da capacidade máxima de adsorção do fósforo aumentando o fósforo remanescente. Além dos calcários, a escória de siderurgia, vem sendo pesquisada quanto a viabilidade de seu uso na neutralização da acidez do solo. Esta neutralização ocorre porque os silicatos presentes nas escórias, promovem a reação dos ânions  $\text{SiO}_3^{2-}$  com a água, liberando hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) para a solução do solo que neutralizam o  $\text{Al}^{3+}$  fitotóxico (KORNDÖRFER et al., 2007). Ramos et al. (2006) observaram que o silicato de Ca, silicato de Ca e Mg e termofosfato promoveram a correção da acidez do solo com maior eficiência que o calcário.

A utilização do ânion silicato, proveniente, por exemplo, das escórias, por competir com o ânion fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo, poderia ser uma das formas para aumentar a eficiência da fertilização fosfatada (PRADO e FERNANDES, 2001). Apesar de serem poucos os trabalhos na literatura a este respeito Chaves e Farias (2009) encontraram efeitos positivos do silicato no fósforo disponível do solo.

Portanto, objetivou-se com este trabalho, avaliar o efeito do agrosilício e de calcário sobre correção da acidez de solos, bem como o efeito destes corretivos na disponibilidade de fósforo em Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) e Latossolo Vermelho Amarelo.

## Material e métodos

O trabalho foi realizado no Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande, utilizando amostras de dois solos bem drenados, Argissolo Vermelho Amarelo (PVA) e Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) provenientes dos municípios de São José da Mata e Bananeiras, respectivamente, do Estado da Paraíba. As amostras destes solos, coletadas na profundidade de 0–20 cm, foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm de diâmetro de malha e caracterizadas de acordo com Embrapa (1997), cujas características químicas e físicas estão apresentadas na Tabela 1.

Como corretivos da acidez do solo foram utilizados o agrosilício produzido pela Hascos Minerais, com 35% de Cálcio, 6% de Magnésio, 10,5% de silício e PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) de 64,6% e calcário dolomítico com 30,80 % de CaO, 14,00 % de MgO e PRNT de 72%.

Para elaborar as curvas de neutralização dos solos com base nestes corretivos, as amostras dos solos foram incubadas com cinco doses crescentes dos corretivos, correspondentes as quantidades necessárias para elevar a saturação por bases do solo em torno de 50, 60, 70, 80 e 90% (Tabela 2).

**Tabela 1** – Caracterização química e física do Argissolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo utilizado como base experimental.

Solo	pH	Ca	Mg	Na	K	H	Al	CTC	P	MO	Argila
		-----mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----							mg dm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
PVA	4,41	4,1	10,9	0,7	1,8	92,0	12,8	122,3	2,8	32,8	329,3
LVA	4,54	8,2	9,4	0,8	0,4	48,9	12,0	79,7	15,3	17,4	111,2

**Tabela 2** - Quantidades de agrosilício e calcário, aplicados aos solos utilizados no experimento.

Doses dos corretivos	Saturação	Argissolo				Latossolo			
		Agrosilício		Calcário		Agrosilício		Calcário	
	%	t ha <sup>-1</sup>	g/vaso	t ha <sup>-1</sup>	g/vaso	t ha <sup>-1</sup>	g/vaso	t ha <sup>-1</sup>	g/vaso
1	50	6,82	0,60	6,12	0,54	3,26	0,24	2,92	0,21
2	60	8,71	0,77	7,82	0,69	4,49	0,33	4,03	0,29
3	70	10,60	0,94	9,52	0,84	5,72	0,42	5,14	0,37
4	80	12,50	1,11	11,21	0,99	6,96	0,51	6,24	0,46
5	90	14,39	1,27	12,91	1,14	8,19	0,60	7,35	0,54

Estas doses foram misturadas a 0,2 kg de solo, contidos em vasos plásticos (unidades experimentais), montados em duplicata, com umidade correspondente a 80% da capacidade de campo, mantida durante todo o período de incubação (50 dias). Sub-amostras de solo foram coletadas das unidades experimentais aos 10, 20, 30, 40 e 50 dias de incubação, para a determinação do pH em água (1:2,5) (EMBRAPA, 1997).

Após um período de 50 dias de incubação, conforme Alvarez e Fonseca (1990), determinaram-se os valores de fósforo remanescente (P-rem) e da capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) dos solos incubados com 50, 70 e 90 % de saturação com

os corretivos. O P-rem foi determinado na solução de equilíbrio solo - solução, obtida pela agitação de 5 cm<sup>3</sup> de TFSA com 50 mL de uma solução de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup> que continha 60 mg L<sup>-1</sup> de P, por uma hora. Após centrifugar e filtrar, o P na solução de equilíbrio foi dosado pelo método da vitamina C, modificado por Braga e Defelipo (1974).

As doses para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos (CMAP) e da constante relacionada com a energia de ligação foram calculadas com base no P-rem e corresponderam a 6; 12; 18; 30; 54; 78; 102 e 114 mg L<sup>-1</sup> de P.

Na determinação do P adsorvido, 2 g de TFSA foram agitados, por 1 h, com 20 mL de uma

solução de  $\text{CaCl}_2$  10 mmol  $\text{L}^{-1}$  que continha P nas concentrações estabelecidas. Após agitação e filtragem, o P da solução de equilíbrio foi dosado colorimetricamente (BRAGA e DEFELIPO, 1974). A diferença entre a quantidade inicial de P na solução e a quantidade na solução de equilíbrio foi considerada como sendo o P adsorvido. Os valores de P adsorvido foram ajustados à equação de Langmuir para estimar a CMAP, de acordo com a equação  $x/m = (kbC)/(1 + kC)$ , em que  $x/m$  é a quantidade de P adsorvido em mg P (x)  $\text{g}^{-1}$  de solo (m);  $k$  é a constante relacionada a energia de ligação do P em  $\text{mg L}^{-1}$ ;  $b$  é a capacidade máxima de adsorção de fosfatos (CMAP) do solo, em  $\text{mg g}^{-1}$  de P no solo e  $C$  é a concentração de P na solução de equilíbrio (sobrenadante), em  $\text{mg L}^{-1}$ . As constantes  $k$  e  $b$  foram estimadas através da equação linear de Langmuir, obtida pela transformação da equação hiperbólica, que corresponde a  $C/x/m = 1/kb + C/b$ . A espontaneidade da reação de adsorção foi obtida a partir do fator de separação RL, uma constante que é expressa por um número adimensional que indica se a reação de adsorção foi espontânea ou não, calculada pela seguinte equação  $RL = 1/(1+kC_0)$  em que  $k$  é a constante relacionada a energia de ligação do P em  $\text{mg L}^{-1}$ ;  $C_0$  = concentração inicial de fósforo em  $\text{mg L}^{-1}$ . O parâmetro RL indica a curvatura da isoterma de sorção: se  $RL > 1$ , a isoterma não é favorável; se  $RL = 1$ , linear;  $0 < RL < 1$ , favorável;  $RL = 0$ , irreversível. A espontaneidade da reação de adsorção foi também descrita matematicamente determinando a energia livre de Gibbs  $\Delta G_0$  (CASAGRANDE et al., 2003),  $\Delta G_0 = RT (\ln C_d \text{ equilíbrio} - \ln C_d \text{ adicionado})$ , sendo  $\Delta G_0$  = energia livre ( $\text{J mol}^{-1}$ ),  $R$  (constante universal dos gases) =  $8,30 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $T = 298 \text{ K}$ , onde  $\Delta G_0$  = variação da energia livre ( $\text{J mol}^{-1}$ );  $R$  = constante universal dos gases ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) e  $T$  = temperatura absoluta ( $T = 298 \text{ K}$ ) (DIAS et al., 2003).

## Resultados e discussão

Os resultados das análises químicas do

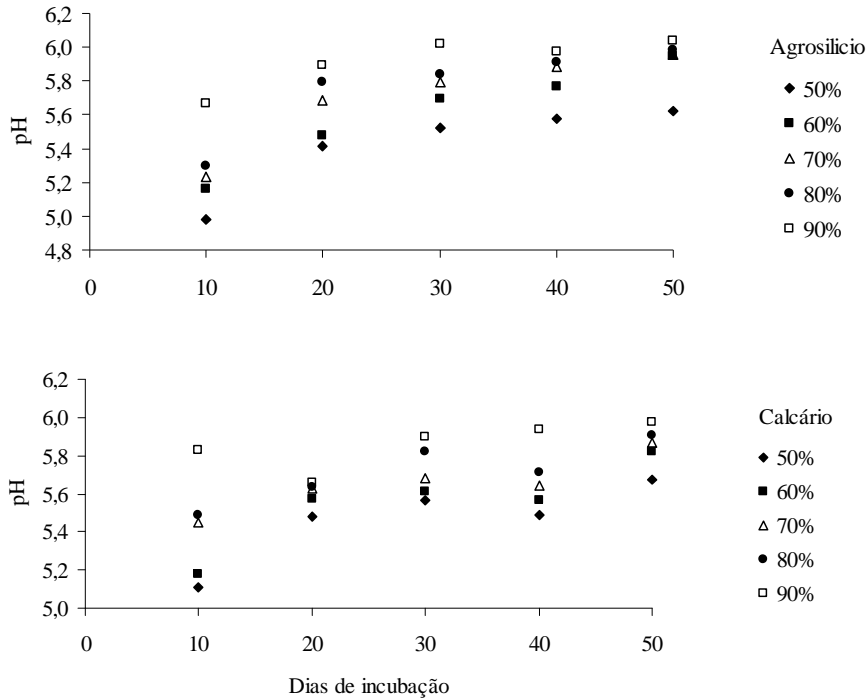
Argissolo e do Latossolo, antes da incorporação dos corretivos mostraram tratar-se de dois solos com acidez elevada ( $< 5,0$ ), com altos teores de alumínio e com baixos teores de cálcio e de fósforo disponível. O Argissolo apresenta altos teores de magnésio, de matéria orgânica e CTC (capacidade de troca catiônica) e teor médio de potássio. O Latossolo apresenta baixo teor de potássio, e teores médios de magnésio, matéria orgânica e CTC, segundo Lopes e Guidolin (1989).

Analisando os valores de pH dos solos incubados com doses crescentes de calcário e de agrosilício, em função do tempo de incubação, observa-se que com dez dias de incubação todas as unidades experimentais, independentemente das doses e do tipo de corretivo utilizado, apresentaram valores de pH maiores, quando comparadas com o pH original do Argissolo (4,41) e do Latossolo (4,54), concordando com os resultados de Prado e Fernandes (2001). Esses valores foram crescentes conforme o tempo de incubação e o aumento das doses de agrosilício e calcário até atingirem a estabilização do pH das amostras de solo em torno de 30 a 40 dias de incubação (Figuras 1 e 2).

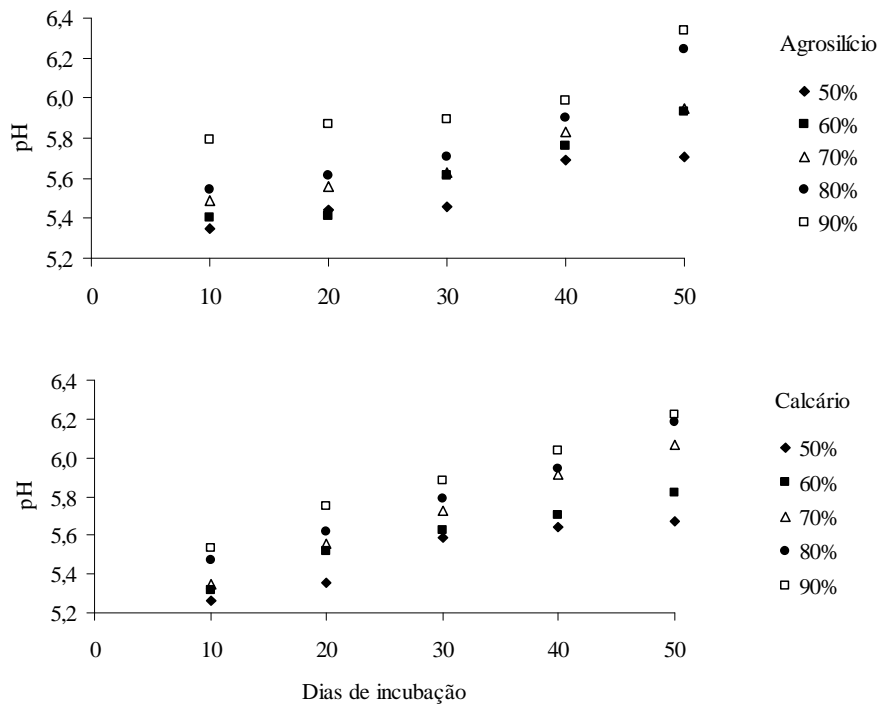
Após 50 dias de incubação, em geral, os valores de pH das unidades experimentais com Latossolo foram maiores do que aqueles com Argissolo, independentemente do tipo de corretivo utilizado (Figura 3). Isto, provavelmente, devido ao maior poder tampão da amostra de Argissolo em decorrência do maior teor de matéria orgânica em relação ao Latossolo.

Os valores de pH das unidades experimentais que receberam o agrosilício foram superiores àqueles das unidades experimentais que receberam o calcário (Figura 3) corroborando Ramos et al. (2006). Segundo Alcarde e Rodella (2003), o silicato de Ca é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de Ca ( $\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g L}^{-1}$  e  $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g L}^{-1}$ ), apresentando, portanto, um maior potencial para a correção da acidez do solo em profundidade que o calcário, discordando do Prado et al. (2002), os quais observaram que o efeito da escória de siderurgia, na correção da acidez do solo, foi inferior ao dos calcários utilizados, ou seja, magnesiano e dolomítico.

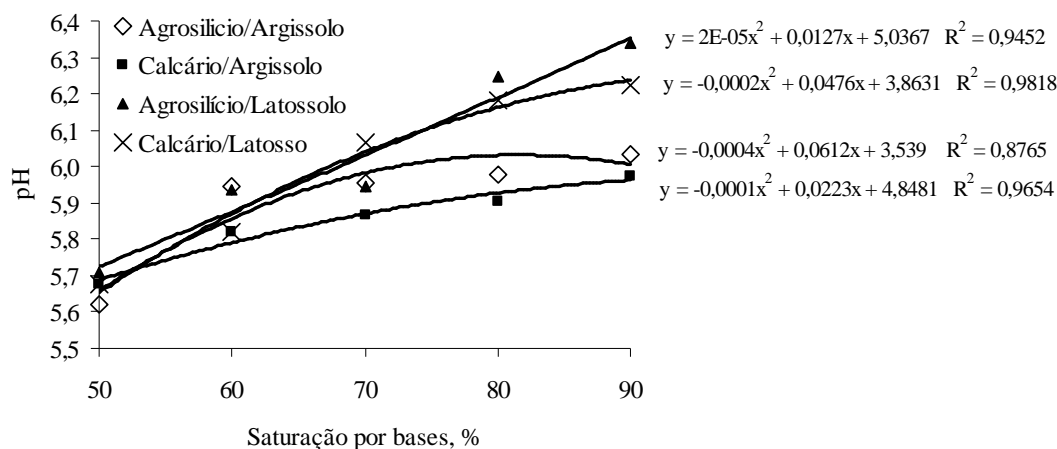
**Figura 1** - Variação do pH do Argissolo incubado com doses crescentes de agrosilício e calcário, em função do período de incubação.



**Figura 2** - Variação do pH do Latossolo incubado com doses crescentes de agrosilício e calcário, em função do período de incubação.



**Figura 3** - Variação do pH dos solos, aos 50 dias de incubação, em função das doses crescentes de agrosilício e calcário.



A diferença entre os valores de pH das unidades experimentais que receberam o calcário e o agrosilício foi pequena. No Argissolo esta diferença variou de 0,98% (amostra com 50% de saturação por bases) a 2,15% (amostra com 60% de saturação por base) e no Latossolo de 0,62% (amostra com 50% de saturação por bases) a 2,01% (amostra com 70% de saturação por bases). Isto mostra que os dois corretivos apresentam efeitos semelhantes na correção da acidez do solo. Segundo Korndörfer et al. (2007), o efeito do agrosilício na reação do solo, deve ter ocorrido devido à neutralização dos prótons ( $H^+$ ), liberando hidróxidos ( $OH^-$ ), pelo ânion silicato ( $SiO_3^{2-}$ ), presente no solo decorrente do processo de solubilização deste produto.

De maneira geral, os valores de CMAP do Argissolo, comparados com os do Latossolo, foram maiores devido o Argissolo ser mais argiloso, com maiores valores de acidez potencial, capacidade de troca catiônica (CTC) e de matéria orgânica, (Tabela 1), corroborando Corrêa et al. (2011).

A adsorção de fósforo no Argissolo, praticamente não diminuiu em função do aumento da saturação por bases com calcário (Tabela 3). Isto porque os polímeros de hidróxidos de alumínio formados com a calagem apresentam

alta afinidade pelo P, aumentando a adsorção do elemento. Essa adsorção também pode ser conseqüência da diminuição do potencial eletrostático do plano de adsorção decorrente do aumento de cátions, por exemplo, do cálcio na superfície negativamente carregada (NOVAIS e SMYTH, 1999). Ao contrário, a adsorção do fósforo no Argissolo que recebeu agrosilício, diminuiu com o aumento da saturação por bases. Ou então, os sítios de adsorção de P podem ter sido bloqueados pelo ânion silicato aumentando o fósforo disponível do solo.

Praticamente os valores da CMAP do Latossolo com agrosilício foram ligeiramente maiores daqueles observados com o calcário (13,33%, 9,09% e 11,11% correspondente as amostras com 50%, 70% e 90% de saturação por bases, respectivamente) no mesmo solo, no entanto, todos foram menores dos valores de CMAP (de 0,3176 a 0,6595  $mg\ g^{-1}$ ) do Latossolo coletado na mesma região do presente trabalho, sem aplicação de corretivo (CHAVES et al., 2012). Diferentemente do que ocorreu com a CMAP do Argissolo, que diminuiu com o aumento das doses dos corretivos e os valores com agrosilício foram menores do que com calcário (Tabela 3).

**Tabela 3** - Equações de Langmuir em sua forma linearizada, seus coeficientes de determinação, parâmetros referentes aos dados de adsorção de fósforo, fator de separação (RL) e energia livre ( $\Delta G_0$ ) nos solos estudados.

Saturação (%)	Equação	R <sup>2</sup>	CMAP	Energia de ligação	RL	$\Delta G_0$
Argissolo						
Agrosilício						
50	C/x/m= 2,11C + 16,18	0,95**	0,47	0,13	0,814 a 0,967	1,245 a 7,241
70	C/x/m= 2,90C + 10,37	0,95**	0,34	0,28	0,670 a 0,932	0,791 a 5,394
90	C/x/m= 2,77C + 23,50	0,94**	0,36	0,12	0,828 a 0,970	0,800 a 4,683
Calcário						
50	C/x/m= 1,73C + 13,22	0,93**	0,58	0,13	0,813 a 0,967	1,649 a 6,735
70	C/x/m= 1,99C + 13,18	0,95**	0,50	0,15	0,790 a 0,962	1,444 a 6,378
90	C/x/m= 1,99C + 17,21	0,95**	0,50	0,12	0,830 a 0,970	1,405 a 5,765
Latossolo						
Agrosilício						
50	C/x/m= 5,83C + 138,7	0,98**	0,17	0,04	0,931 a 0,989	0,333 a 1,413
70	C/x/m=8,50C + 20,87	0,89**	0,12	0,41	0,583 a 0,904	0,235 a 1,973
90	C/x/m= 4,99C + 121,8	0,91**	0,20	0,04	0,581 a 0,903	0,352 a 1,514
Calcário						
50	C/x/m= 6,77C + 94,89	0,94**	0,15	0,07	0,888 a 0,981	0,303 a 1,486
70	C/x/m=9,18C + 111,8	0,92**	0,11	0,08	0,874 a 0,979	0,243 a 1,504
90	C/x/m= 5,44C + 142,8	0,93**	0,18	0,04	0,937 a 0,990	0,342 a 2,270

O modelo de Langmuir foi adequado aos valores experimentais, bem ajustado e significativo às diversas condições de solo e concentrações de fósforo, como pode ser constatado pelos altos valores dos coeficientes de determinação das equações de adsorção de fósforo (Tabela 3), corroborando Imtiaz e Alloway (2006), Nascimento e Fontes (2004), Reyhanitabar et al. (2007) e Souza et al. (2006).

As isotermas de adsorção de P (Figura 4), correspondentes as unidades experimentais estudadas, demonstraram que as quantidades de P adsorvidas por elas aumentaram com a concentração da solução de equilíbrio corroborando Chaves et al. (2007), Falcão e Silva (2004), Godinho et al. (1997), Rolim Neto et al. (2004) e Valladares et al. (2003).

As diferentes inclinações das curvas demonstram que o Latossolo tem comportamento diferente do Argissolo em relação à adsorção de fósforo (Figura 4). Observa-se que o Argissolo apresentou o tipo H (Hight) de isoterma, conforme classificação de Giles et al. (1974), o que indica

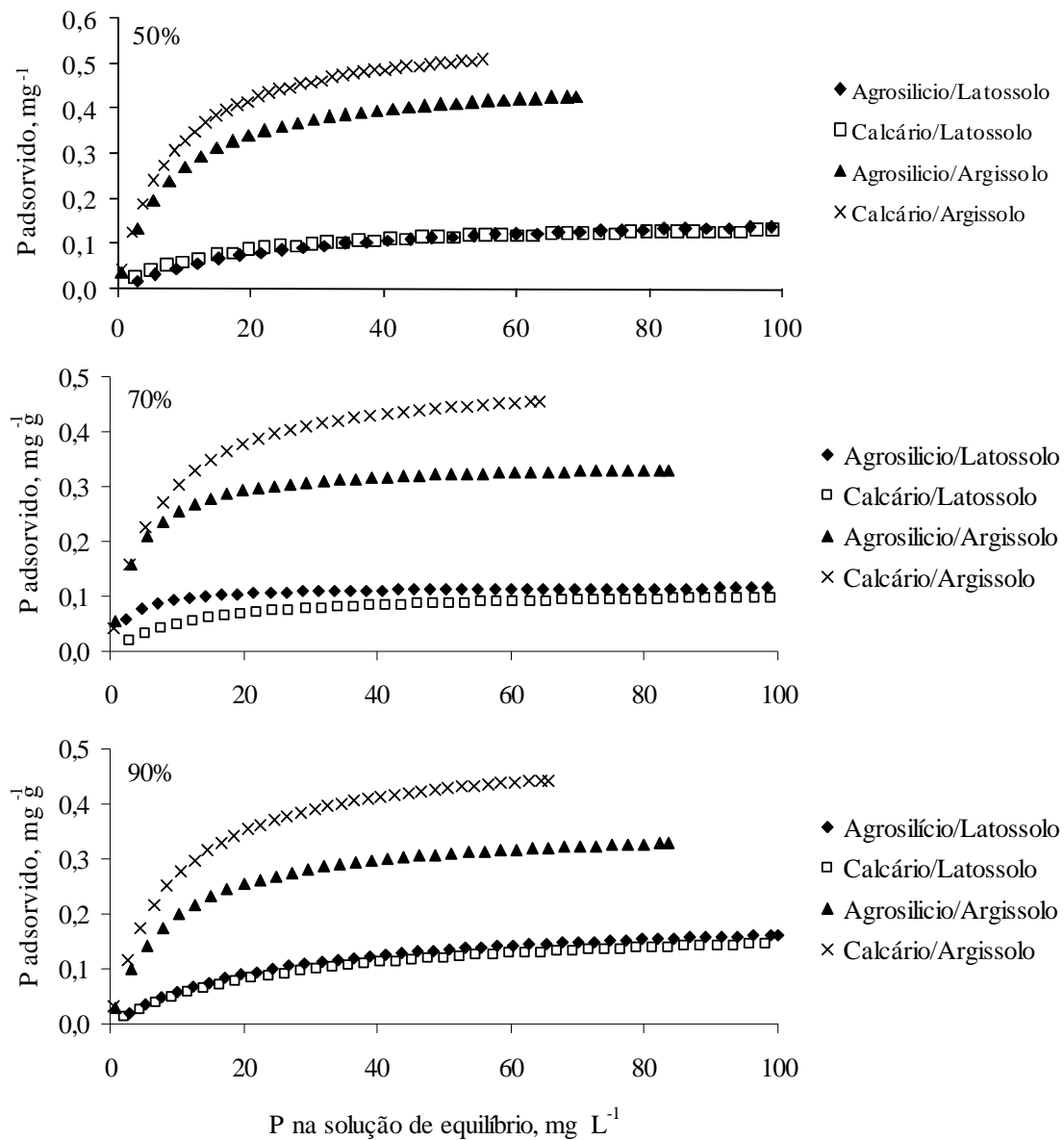
alta afinidade de adsorção de fósforo. O Latossolo apresentou isotermas do tipo L (Langmuir), com menor energia de adsorção, caracterizadas por baixa inclinação, pois os sítios de adsorção disponíveis diminuem quando aumenta-se demasiadamente a cobertura da superfície adsorvente. A sobreposição das curvas de adsorção de fósforo no Latossolo mostra que os corretivos agrosilício e calcário agiram de forma semelhante durante a neutralização da acidez e conseqüentemente, nos sítios de adsorção.

Comparando o efeito do calcário e do agrosilício quanto à disponibilidade de fósforo, as amostras de Argissolo que receberam o agrosilício apresentaram teores de fósforo disponível mais elevados em relação aquelas que receberam calcário (Figura 4), corroborando Prado e Fernandes (2001). A maior eficiência do agrosilício em manter os teores de fósforo disponível no solo mais elevados do que o calcário, pode ter sido decorrente de algum efeito do silicato contido no agrosilício, exercendo uma

competição dos ânions de silicato com o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção (SMITH e SANCHEZ, 1980). A utilização do ânion silicato, proveniente das escórias, por competir com o

ânion fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo, poderia ser uma das formas para aumentar a eficiência da fertilização fosfatada (PRADO e FERNANDES, 2001).

**Figura 4** - Relação entre os teores de P na solução de equilíbrio e os adsorvidos nos solos com 50, 70 e 90% de saturação por bases, A, B e C, respectivamente.

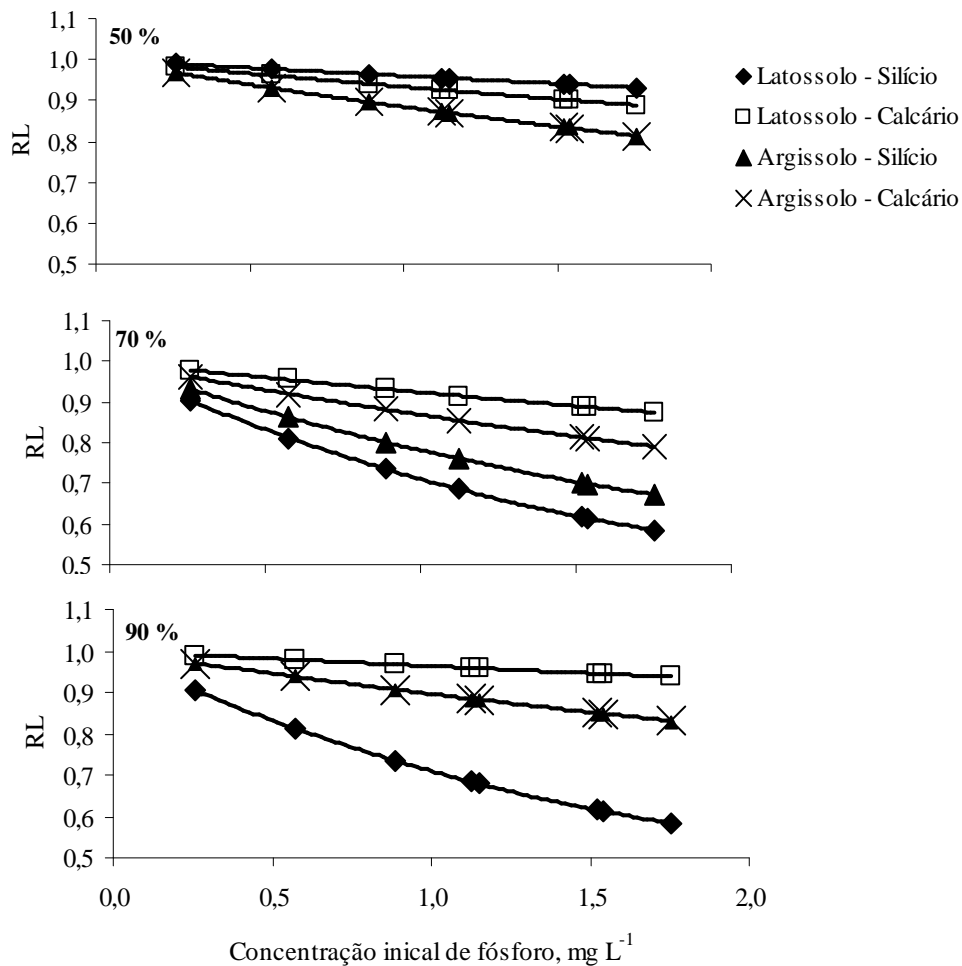




Segundo Soares et al, (2005), a adsorção é favorável e espontânea quando  $RL < 1$  (fator de separação), enquanto valores  $RL > 1$  indicam falta de espontaneidade da reação. Com esta abordagem observa-se que para as amostras de Argissolo e Latossolo com calcário e agrosilício (Tabela 3) a adsorção foi favorável e espontânea, independentemente dos diferentes atributos químicos e físicos das amostras de solo.

Os menores valores RL foram obtidos pelas maiores quantidades de fósforo adicionadas (Figura 5). Isto indica que a reação de adsorção foi mais favorável para as mais elevadas concentrações iniciais de fósforo, mostrando que as amostras do Latossolo e do Argissolo incorporadas com silício ou calcário foram sistemas eficientes para a retenção de fósforo, mesmo com algumas variações.

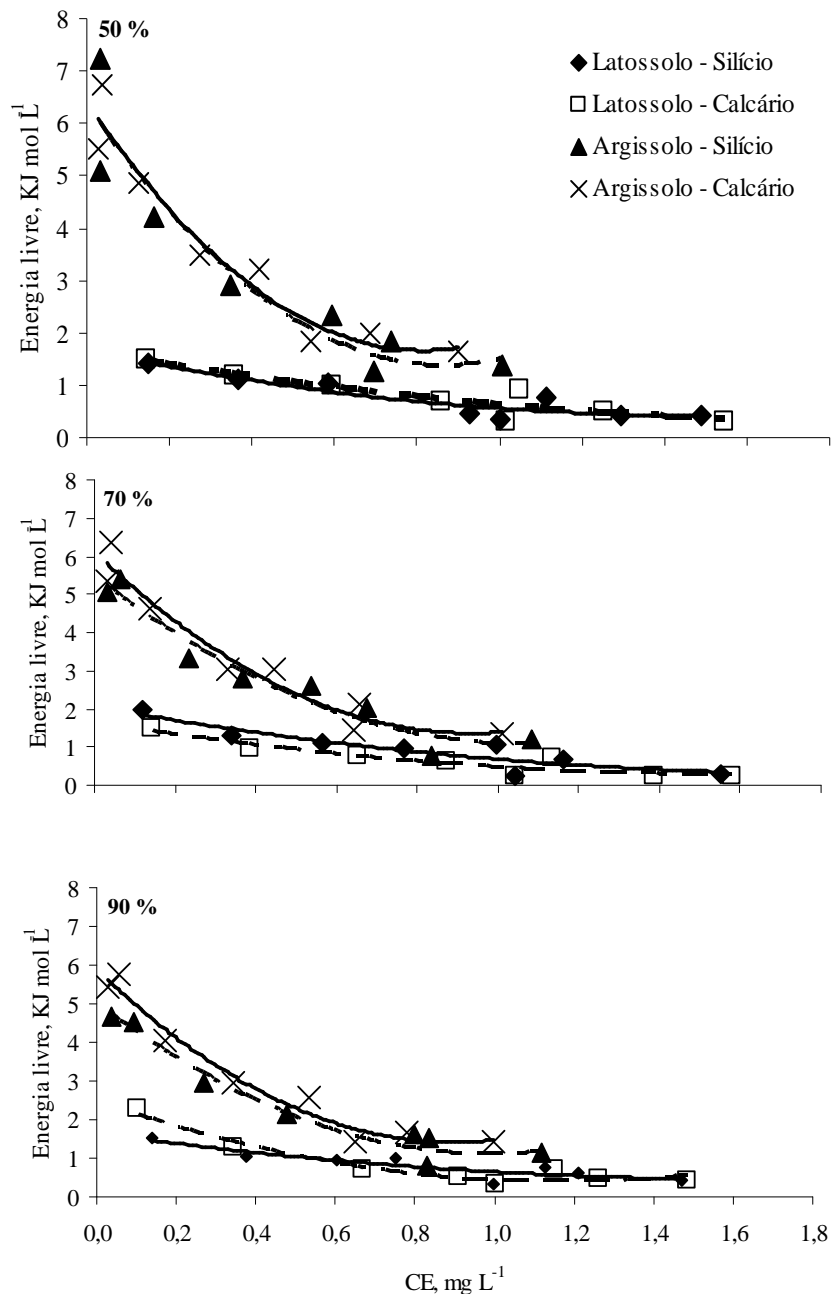
**Figura 5** - Variação do fator de separação (RL) em função do fósforo adicionado aos solos do Estado da Paraíba com 50, 70 e 90% de saturação por bases, com silício e calcário.



Os valores mais elevados de RL (mais próximos a 1) são do Latossolo (70 e 90 % de saturação por base) corrigido com calcário indicando que a adsorção de fósforo por estas

amostras de solo foram menos favorecidas ou espontâneas. Em contraste, nas demais amostras de solo a adsorção de fósforo foi mais favorecida ou espontânea.

**Figura 6** - Energia livre, em módulo, da reação de adsorção do fósforo pelos solos do Estado da Paraíba com 50, 70 e 90% de saturação por bases, com silício e calcário.



A força que atua nas reações de adsorção é o gradiente de energia livre de Gibbs ( $\Delta G_0$ ). Os resultados de energia livre,  $\Delta G_0$ , foram negativos para todas as amostras (Figuras 6) o que demonstra que a quantidade de fósforo em equilíbrio na solução foi sempre inferior ao valor de fósforo adicionado. Assim, a reação de adsorção de fósforo foi termodinamicamente exotérmica e espontânea com energia liberada (CASAGRANDE et al., 2008; SOARES et al., 2005).

Observa-se que a energia livre, em módulo, diminuiu com o aumento da concentração do fósforo na solução de equilíbrio, ou seja, quanto maior a concentração do elemento na solução menos o elemento é fortemente retido (Figura 6). Nas amostras do Latossolo, a concentração do fósforo na solução de equilíbrio foi maior em relação às amostras do Argissolo, devido à menor energia livre dessas amostras (Figura 6). De acordo com Iglesias et al. (2007), a matéria orgânica e teor de argila devem ter sido os principais fatores responsáveis por esse comportamento, uma vez que, os teores de matéria orgânica e argila no Argissolo foram maiores do que no Latossolo e conseqüentemente, maior energia livre.

Da mesma forma que foi apresentada na Figura 4, a aplicação de agrosilício no Argissolo, em relação ao calcário, resultou em maior teor de fósforo disponível devido a menor energia livre principalmente nas amostras com 70 e 90 % de saturação por bases (Figura 6). Em relação às porcentagens de saturação por base, as amostras de Argissolo com 50 % de saturação apresentaram maior energia livre que as demais amostras, mostrando com isso menor teor de fósforo na solução de equilíbrio.

### Conclusões

O agrosilício apresentou eficiência igual ou maior ao calcário, na correção da acidez dos solos.

O modelo de Langmuir conseguiu descrever satisfatoriamente a adsorção do fósforo para os solos estudados.

O fósforo apresentou maior afinidade pelas amostras de Argissolo, como indicado pelos altos

valores da capacidade máxima de adsorção do fósforo e da energia de ligação de Langmuir os quais foram influenciados pela matéria orgânica, acidez e teor de argila do solo.

O fósforo foi adsorvido pelos solos por reações energeticamente favoráveis e espontâneas.

A energia livre de adsorção de fósforo diminuiu com o aumento da concentração de fósforo adicionado nos solos Argissolo e Latossolo corrigidos com calcário e agrosilício.

A disponibilidade de fósforo em amostras de Argissolo foi semelhante tanto com a aplicação de calcário como de agrosilício. Nas amostras de Latossolo foi melhor com a aplicação de agrosilício.

### Referências

- ALCARDE, J. A.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade brasileira de Ciência do Solo, p. 291-334, 2003.
- ALVARÉZ, V., V. H.; FONSECA, D. M. 1990. 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**, v. 14, n. 1, p.49-55, 1990.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, Viçosa, v.21, p.73-85, 1974.
- CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 51-59, 2003.
- \_\_\_\_\_; SOARES, M. R.; MOUTA, E.R. Zinc adsorption in highly weathered soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 131-139, 2008.

CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; MENDES, J. S. Adsorção de fósforo em materiais de Latossolo e Argissolo. **Caatinga**, v.20, n.3, p.104-111, 2007.

\_\_\_\_\_; CAMPOS, V. B.; SOUSA, M. S. S.; GUEDES FILHO, D. H.; ESTRELA, M. A.; BARROS, A. D. Phosphate sorption in Oxisols in Paraíba State, Brazil, classified as solution equilibrium phosphorus. **Iranica Journal of Energy & Environment**, v. 3, n. 1, p. 17-22, 2012.

\_\_\_\_\_; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n.2, p. 211-218, 2009.

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.12, p.1231-1237, 2004.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 153-159, 2011.

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Energia livre da reação de adsorção de cádmio em latossolos ácidos. **Ciência Rural**, v. 33, n.5, p. 829-834, 2003.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo, 1997. 212p.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; CAMPOS, M. L. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.3, p.537-544, 2000.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da

Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v.34, n.3, p. 337-342, 2004.

GILES, C. H.; SMITH, D.; HUITSON, A. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 47, n.2, p.755-765, 1974.

GODINHO, V. P. C.; SAMPAIO, R. A.; ALVAREZ V., V. H.; RUIZ, H. A. Adsorção de fosfatos em três solos da região semi-árida do Rio Grande do Norte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, n.8, p.819-823, 1997.

IGLESIAS, C. S. M.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Efeito da natureza do eletrólito e da força iônica na energia livre da reação de adsorção de níquel em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.5, p. 897-903, 2007.

IMTIAZ, M.; ALLOWAY, B.J. Zinc Sorption in Selected Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.37, n. 11-12, p. 1675-1688, 2006.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; OLIVEIRA, L.A. **Aplicação de silicatos no solo**. Disponível em:<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Fontes%20de%20Si/fontes.htm>. Acesso em 21 set. 2007.

LOPES, A. S.; GUIDOLIN, J. A. **Interpretação de análise do solo: conceitos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Comitê de Pesquisa/Técnico/ANDA, 1989. 64 p.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de Latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.965-971, 2004.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo

cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p.1199-1204, 2001.

\_\_\_\_\_; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P.. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.4, p.539-546, 2002.

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n.6, p.849-857, 2006.

REYHANITABAR, A.; KARIMIAN, N.; ARDALAN, M.; SAVAGHEBI, G.; GHANNADHA, M. Comparison of five adsorption isotherms for prediction of zinc retention in calcareous soils and the relationship of their coefficients with soil characteristics. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.38, n. 1-2, p.147-158, 2007.

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**, v. 28, n. 6, p.953-964, 2004.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Parametros termodinâmicos da reação de adsorção de boro em solos tropicais altamente intemperizados. **Química Nova**, v. 28, n.6, p.1014-1022, 2005.

SOUZA, R. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D. Adsorção de zinco e sua relação com características de solos do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, n.1, p.1-6, 2006.

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

Recebido em: 05/11/2012  
Aceito em: 27/06/2014