

CARACTERÍSTICAS DE SORÇÃO DE FÓSFORO
EM SOLOS DO ESTADO DO CEARÁ

PAULO PEREIRA BESSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
EM SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

FORTALEZA - 1991

Esta Dissertação foi apresentada como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Agronomia Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas - outorgado pela Universidade Federal do Ceará e em cuja Biblioteca Central se encontra à disposição dos interessados.

A citação de qualquer texto desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Paulo Pereira Bessa

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 18 / 12 / 91

Prof. BOANERGES FREIRE DE AQUINO. Ph D
Orientador da Dissert.

Prof. FERNANDO FELIPE FERREYRA HERNANDEZ, Doutor

VERA LÚCIA BAIMA FERNANDES

Aos meus pais
José e Antônia
À minha esposa
Margareth e
ao meu filho
João Luís
D E D I C O

AGRADECIMENTOS

A coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela cooperação financeira, através de bolsa de estudo.

Ao professor Guilherme Lincoln Aguiar Ellery, Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa da UECE, por ter possibilitado a continuidade deste trabalho.

A coordenação do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Ceará e todo o Corpo Docente do Departamento de Ciências do Solo, pela consideração e pelos ensinamentos recebidos.

Ao Professor Boanerges Freire de Aquino, pela orientação recebida e confiança dispensada.

Aos Professores Vera Lúcia Baima Fernandes e Fernando Felipe Ferreyra Hernandez pelas valiosas críticas e sugestões apresentadas.

Aos Funcionários do Departamento de Ciências do Solo pela presteza e amizade, em particular ao amigo Antônio Luís, pela colaboração nos trabalhos de laboratório.

Finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

	<u>Página</u>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	vii
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	x
<u>RESUMO</u>	xii
<u>ABSTRACT</u>	xiv
<u>1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2 - REVISÃO DE LITERATURA</u>	3
<u>2.1 - Considerações Gerais</u>	3
<u>2.2 - Fatores que influenciam a sorção de P</u> <u>pelo solo</u>	8
<u>2.3 - Mecanismos de sorção do fósforo</u>	17
<u>2.4 - Determinação da capacidade tampão do</u> <u>fósforo</u>	21
<u>3 - MATERIAL E MÉTODO</u>	27

3.1 - Solo	27
3.2 - <u>Procedimento experimental</u>	28
3.2.1 - Obtenção das isotermas de sorção	28
3.2.2 - Determinação do índice de tamponamento dos solos.....	30
3.2.3 - Determinação da capacidade de sorção máxima de fósforo	32
4 - <u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	34
4.1 - <u>Fósforo sorvido pelos solos</u>	34
4.2 - <u>Sorção máxima</u>	47
4.3 - <u>Capacidade tampão dos solos</u>	49
4.4 - <u>Relações entre sorção máxima, capacidade tampão e as propriedades dos solos</u>	54
5. <u>CONCLUSÕES</u>	57
6. <u>LITERATURA CITADA</u>	59
7. <u>APÊNDICE</u>	75

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Algumas propriedades químicas e físicas dos solos estudados.....	29
2	Concentração de fósforo na solução de equilíbrio após 24 horas.....	45
3	Quantidade de fósforo sorvida pelos solos após o equilíbrio (24 horas)..	46
4	Valores de sorção máxima (X_m), energia de retenção (K) e índice de tamponamento (KX_m) dos solos equilibrados com soluções de concentrações entre 0-20ppm de P, após 24 horas de equilíbrio em $CaCl_2$ 0,01M.....	51
5	Equações de regressão linear obtidas das relações entre o fósforo sorvido (C/X, ug P/g dos solo) e o fósforo da	

	solução de equilíbrio (C, ug/ml) para os solos equilibrados em soluções de concentração variando de 0-20 ppm de P, após 24 horas de agitação em CaCl_2 0,01M.....	53
6	Coeficientes de correlação linear obtidos a partir da relação entre sorção máxima (X_m), capacidade tampão máxima (CTM) e algumas propriedades dos solos estudados.....	56
7	Equações de regressão linear obtidas da relação entre sorção máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos solos estudados (x).....	76
8	Equações de regressão linear obtidas da relação entre sorção máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos latossolos (x).....	77
9	Equações de regressão linear obtidas da relação entre a sorção máxima do fósforo (y) e algumas propriedades dos cambissolos (x).....	78

10	Equações de regressão Linear obtidas da relação entre capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos solos estudados (x).	79
11	Equações de regressão linear obtidas da relação entre capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos latossolos (x).....	80
12	Equações de regressão linear obtidas da relação entre a capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos cambissolos (x).....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ilustração gráfica da curva característica de sorção de P usada para determinação da capacidade tampão do solo.....	33
2	Isoterma de sorção de fósforo do solo PE ₁ (Viçosa - CE).....	36
3	Isoterma de sorção de fósforo do solo LV ₁ (Ubajara - CE)....	37
4	Isoterma de sorção de fósforo do solo LV ₂ (Ibiapina - CE)...	38
5	Isoterma de sorção de fósforo do solo LV ₃ (Crato - CE).....	39
6	Isoterma de sorção de fósforo do solo LV ₄ (Crato - CE).....	40

7	Isoterma de sorção de fósforo do solo PE ₂ (Palmácia - CE)...	41
8	Isoterma de sorção de fósforo do solo Ce ₁ (Quixeré - CE)....	42
9	Isoterma de sorção de fósforo do solo Ce ₂ (Quixeré - CE)....	43
10	Isoterma de sorção de fósforo do solo Ce ₃ (Quixeré - CE)...	44

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar as características de sorção de nove solos do Estado do Ceará em condições de laboratório. Os solos foram coletados a profundidade de 0-25cm; para a obtenção das isotermas de sorção, utilizou-se 1g de TFSA e adicionou-se 25ml de CaCl_2 0,01M, contendo concentrações crescentes de fósforo na forma de KH_2PO_4 (0, 2, 3,5, 5, 8, 12, 15 e 20 ppm de P). As soluções foram agitadas por 24 horas à temperatura de 25°C e em seguida centrifugadas a 2000rpm; a sorção máxima (X_m), foi calculada a partir da equação de Langmuir em sua forma linear. Observou-se que os latossolos possuem uma maior capacidade de sorção do que os demais solos. A sequência da capacidade de sorção máxima de fósforo obtida, LV_3 (Crato-CE) > LV_4 (Crato-CE) > Ce_1 (Quixeré-CE) > Ce_3 (Quixeré-CE) > LV_2 (Ibiapina-CE) > LV_1 (Ubajara-CE) > PE_2 (Palmácia-CE) > Ce_2 (Quixeré-CE) > PE_1 (Viçosa-CE), está de acordo com o esperado, principalmente considerando os solos com elevados teores de alumínio e argila; o nível original de P dos solos foi um importante fator na quantidade de fósforo sorvida; verificou-se ainda que uma maior sorção de P ocorria à medida que se elevava a concentração de P na solução de equilíbrio.

A capacidade tampão máxima foi determinada pela

inclinação máxima da isoterma de Langmuir para uma única superfície de sorção, segundo a expressão $dX/dC_e \rightarrow 0 = KX_m$. Depreende-se que esta expressão representa o potencial máximo de capacidade de sorção de fósforo. Verificou-se que os solos apresentaram um comportamento diferenciado quanto a capacidade tampão máxima na seguinte ordem decrescente: LV₃ (Crato-CE) > LV₄ (Crato-CE) > Ce₁ (Quixeré-CE) > Ce₃ (Quixeré-CE) > LV₂ (Ibiapina-CE) > LV₁ (Ubajara-CE) > PE₁ (Viçosa-CE) > PE₂ (Palmácea-CE) > Ce₂ (Quixeré-CE).

ABSTRACT

Under laboratory conditions an experiment was carried out in order to study the sorption characteristics of nine soils of the Ceará State, Brazil, which samples were collected from a 0-25cm depth. The sorption isotherms were obtained using 1g of soil in 25ml of a CaCl_2 0.01M solution with increasing P concentrations (0, 2, 3.5, 5, 8, 12, 15 e 20 ppm P - KH_2PO_4). The solutions were agitated for 24 hours and centrifugated at 2000 rpm; the maximum sorption (X_m) of each soil was determined from the linear form of Langmuir equation. It was observed that the Latossolos (Oxisols) have a greater sorption capacity than the other soils. A decreasing sequence of maximum sorption capacities was obtained: $\text{LV}_3(\text{Crato-CE}) > \text{LV}_4(\text{Crato-CE}) > \text{Ce}_1(\text{Quixeré-CE}) > \text{Ce}_3(\text{Quixeré-CE}) > \text{LV}_2(\text{Ibiapina-CE}) > \text{LV}_1(\text{Ubajara-CE}) > \text{PE}_2(\text{Palmácia-CE}) > \text{Ce}_2(\text{Quixeré-CE}) > \text{PE}_1(\text{Viçosa-CE})$. The above sequence is in accordance with the literature since the studied soils are high in exchangeable aluminum and in clay content. The level of the native P of each soil was an important factor in determining the amount of P sorbed. A close correlation was verified between the P concentration in solution and the amount of P sorbed. The maximum P buffer capacity was

determined considering the maximum inclination of the Langmuir isotherm, according to the expression $dX/dC_e \rightarrow \infty = kX_m$. The KX_m term represents the maximum potential of P sorption capacity of the soil. In relation to the maximum P buffer capacity, the soils included in the present study were classified in the following decreasing order: LV_3 (Crato-CE) > LV_4 (Crato-CE) > Ce_1 (Quixeré-CE) > Ce_3 (Quixeré-CE) > LV_2 (Ibiapina-CE) > LV_1 (Ubajara-CE) > PE_1 (Viçosa-CE) > PE_2 (Ibiapina-CE) > Ce_2 (Quixeré-CE).

1 - INTRODUÇÃO

Considerando o importante papel exercido pelo fósforo no desenvolvimento das plantas, tais como a influência na divisão celular e na floração (formação de sementes), é plenamente justificável que seu comportamento no solo seja objeto de intensas investigações; principalmente, nas regiões tropicais onde os solos fixam grandes quantidades de fósforo, fazendo com que os fertilizantes fosfatados, quando aplicados ao solo, passem rapidamente à formas de fosfatos férricos e aluminicos, se tornando, então, pouco disponíveis para as plantas; conseqüentemente, se faz necessário a aplicação de grandes quantidades desse elemento, que em geral são bem mais elevadas que aquelas requeridas pelas culturas para a obtenção de ótimos rendimentos.

Sorção de fósforo pode ser definida como o processo pelo qual o fósforo solúvel é transformado em produtos menos solúveis através de reações com componentes inorgânicos, resultando na diminuição da sua disponibilidade. A sorção de fósforo no sistema solo/solução tem sido estudada através do emprego da isoterma de Langmuir, cujo fundamento é baseado no princípio da sorção de gases sobre superfícies sólidas; a equação derivada desta isoterma tem sido largamente usada em inúmeros trabalhos de pesquisa envolvendo as reações de P no

solo. A menor ou maior sorção varia entre os diferentes solos, esta diferença na sorção de P inclui a natureza e a extensão da superfície disponível para a sorção, bem como o nível de energia com que o íon fosfato está retido e está relacionada com sua capacidade tampão a qual se refere a habilidade do fósforo da solução do solo em resistir à mudanças quando o fósforo é adicionado ou removido do solo. Os solos estudados nesta pesquisa apresentam baixos níveis de fósforo nativo (média em torno de 3,8ppm). No Ceará, ocorrem extensas áreas de solos com alta capacidade de fixação de P e representam as mais desenvolvidas regiões agrícolas do Estado; estes solos possuem uma alta capacidade para transformar o fósforo adicionado, de solúvel em água a fósforo não disponível às plantas.

Este trabalho foi desenvolvido buscando-se conhecer a capacidade de fixação dos nove solos estudados, fornecendo assim, subsídios para o estabelecimento de uma adubação fosfatada que satisfaça as reais necessidades nutricionais das plantas, bem como visando o aumento da produtividade das culturas.

2 - REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Considerações Gerais

O fósforo é um elemento de baixa mobilidade no solo, limitando, dessa forma, a produtividade das culturas. A sua retenção pelo solo exerce um importante papel na sua disponibilidade para as plantas.

O fósforo se encontra na natureza principalmente como ortofosfato e possui uma alta capacidade para reagir com a fase sólida, bem como com certos íons (Ca^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+}) que se encontram na solução do solo. A forma predominante em solos ácidos é o íon $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, podendo ocorrer variações à medida que ocorrem mudanças no pH do solo. OLSEN & WATANABE (1957), usando a isoterma de Langmuir, encontraram valores de energia de ligação do P para os solos ácidos e alcalinos e verificaram que quando esses valores aumentam cresce a força com que o P é retido no solo.

Sorção de fósforo pode ser descrita como um fenômeno de retenção deste elemento sobre a superfície de partículas do solo (sítios de troca ou de reação, colóides minerais e orgânicos do solo). Quando adubos fosfatados solúveis são aplicados ao solo, o P-solução aumenta, mas a maior parte do P

é sorvido pela fase sólida do solo, o qual induz uma diminuição deste na solução do solo; a sua disponibilidade para as plantas está associada a uma alta ou baixa energia dos sítios de troca. Já o P precipitado em compostos insolúveis ou sorvido por sítios de troca de elevada energia, pode ser considerado de aproveitamento incerto pelas plantas.

CATANI (1947), estudando a sorção do ânion PO_4^{3-} em solos do tipo Terra Roxa, obteve resultados que comprovam que o fenômeno da sorção não inutiliza o fósforo para as plantas, constituindo apenas um obstáculo à lixiviação. Parte do fósforo sorvido passa a constituir o P não lábil, mas parte tende a entrar na solução do solo. Isto tem sido descrito por equações de isothermas de sorção, tais como a isoterma de Langmuir (OLSEN & WATANABE, 1957; WOODRUFF & KAMPRATH, 1965; FASSBENDER, 1966) e a isoterma de Freundlich (KURTZ et al., 1946; LOW & BLACK, 1950). Quando os dados de sorção se ajustam a ambas as equações, o uso da isoterma de Langmuir é preferível uma vez que o valor da sorção máxima pode ser calculado, além de proporcionar a descrição do comportamento do fósforo sorvido.

O valor da sorção máxima de fósforo tem sido usado como uma estimativa da quantidade desse nutriente requerida pelos solos para obter-se o crescimento máximo das plantas; solos que apresentam maior capacidade de sorção máxima necessitam doses mais elevadas de fósforo para a obtenção de produções máximas. WOODRUFF & KAMPRATH (1965), trabalhando com millete em casa de vegetação, observaram que o rendimento má-

ximo da cultura ocorreu quando os solos receberam doses de fósforo que variavam de 1/4 a 1,0 do valor da sorção máxima dos solos.

O grau de saturação do potencial de sorção máxima influi bastante no fator intensidade-concentração de fósforo na solução do solo, uma vez que a energia de sorção diminui com o aumento da saturação (GUNARY & SUTTON, 1967; WILLIAMS, 1967; KAMPRATH, 1974).

Em latossolos sob vegetação de cerrado do Estado de Goiás e em latossolos do Estado de Minas Gerais, tem sido encontrado, em trabalhos realizados em casa de vegetação, que produção máxima é obtida quando a dose de P aplicada varia entre 0,4 a 1,3 do valor da sorção máxima dos solos (BRAGA & DEFELIPO, 1972; BAHIA FILHO & BRAGA, 1975; VASCONCELOS et al., 1975).

O termo disponibilidade sugerido por BRAY (1947), mostra unicamente o relacionamento, em determinado momento, entre a quantidade do nutriente e o crescimento vegetal. Ao se relacionar teor de P no solo com o teor na planta, os resultados fornecem valores que nem sempre correspondem as quantidades disponíveis para as plantas.

Muitos investigadores têm procurado estabelecer correlações entre os teores de nutrientes dos solos, extraídos e determinados por métodos químicos, com as respostas das plantas a estes nutrientes, utilizando-se tais correlações para a aferição de índices interpretativos de fertilidade do solo, bem como determinar o nível de probabilidade de respostas das

culturas à adubação.

Estudos de calibração com fósforo foram conduzidos por MUZILLE et al., (1982) para estimar as doses econômicas de adubos na cultura do milho em Latossolo Roxo Eutrófico (textura argilosa), Latossolo Roxo Distrófico (textura argilosa), Latossolo Vermelho-Escuro Álico (textura média). Os autores observaram que a adubação fosfatada se caracterizou como prática necessária e importante para o aumento da produtividade do milho e seus efeitos mostraram estar relacionados com a disponibilidade do nutriente revelada pela análise do solo; os incrementos de produção obtidos com baixo e médio teores de fósforo, justificaram economicamente o emprego da adubação fosfatada, enquanto que para as classes de solo que possuem teores alto e muito alto, a baixa resposta à adubação fosfatada sugere a adoção dessa prática como adubação de reposição, desde que tal medida seja considerada um investimento e não um custo direto de produção.

Por outro lado existem outros conceitos que descrevem a dinâmica do nutriente do solo, como os fatores intensidade, quantidade e capacidade. O fator intensidade é usualmente medido pela concentração ou atividade de íons ortofosfato em solução, pelo potencial químico de $H_2PO_4^{2-}$ ou pelo potencial de fosfato monocálcico (OLSEN & KHASAWNHE, 1980). O fator quantidade mede o P-lábil no solo e é constituído pelo fósforo da fase sólida que se encontra em equilíbrio com a solução (BAHIA FILHO et al., 1983).

Ao se referir à relação quantidade/intensidade,

BECKWITH (1965) admitiu como sendo de 0,2ppm o valor ideal de fósforo na solução de equilíbrio para o crescimento máximo da cultura. KAMPRATH (1977), e FOX & KAMPRATH (1970) obtiveram máximos rendimentos de culturas com P na solução de equilíbrio de 0,2 a 0,07ppm. KAMPRATH (1967), encontrou que acima de 8ppm de P disponível no solo (extraído por extratores químicos) não mais ocorreu aumento de produção.

ALMEIDA NETO & BRASIL SOBRINHO (1977), estudando a sorção de fósforo em três latossolos sob vegetação de cerrado do Estado de Goiás, observaram que os solos que apresentaram maior sorção máxima exigiram maiores quantidades de fósforo para suas produções máximas de painço. OZANNE & SHAW (1967), selecionaram uma concentração padrão de 0,3ppm de P na solução de equilíbrio como um índice de sorção suficiente para se alcançar a produtividade máxima de pastagem. NOVAIS & KAMPRA-TH (1979), estudando cinco ultissolos da Carolina do Norte com fatores intensidades diferentes, e que receberam adubação fosfatada por muitos anos, e posteriormente cultivados em casa de vegetação, apresentaram resultados que sugerem que os parâmetros da isoterma de Langmuir e Freundlich não são suficientes para definir a quantidade de fósforo a ser aplicada ao solo para que se tenha o crescimento máximo de plantas.

2.2 - Fatores que influenciam a sorção de P pelo solo

A quantidade de fósforo fixada pelo solo depende de vários fatores tais como: teores de ferro e alumínio, teor de matéria orgânica, pH, teor e composição de argila, natureza e quantidade dos cátions presentes no complexo de troca e tempo.

Estudos com solos ácidos indicam que a calagem tem efeito benéfico sobre a disponibilidade de fósforo em solos com elevado nível de alumínio; já em solos ácidos, sem alumínio a calagem não aumenta a disponibilidade de fósforo para as plantas (KAMPRATH, 1977), UDO & UZO (1972), trabalhando com dez solos ácidos da Nigéria, chegaram a conclusão, que o alumínio foi mais importante do que o ferro na sorção do fósforo. SYERS et al., (1971) estudando a sorção de fósforo em solos ácidos do Rio Grande do Sul, mostraram que esta ficou reduzida em 19 a 100% se removidos o ferro e alumínio amorfos, (em oxalato), em comparação com solos não tratados. A sorção do fósforo adicionado foi sempre melhor correlacionada com compostos de Al do que com compostos de Fe, embora se torne difícil dizer qual o parâmetro mais importante. WOODRUFF & KAMPRATH (1965), trabalhando com vários solos com ampla variação em propriedades químicas, chegaram a conclusão que a neutralização do alumínio reduziu marcadamente a sorção máxima de fósforo; em adição, nos solos com alta saturação de alumínio trocável, era necessário uma alta concentração de

fósforo para se obter um rendimento máximo. SÁ JÚNIOR et al., (1968), estudando solos da zona da mata de Pernambuco, concluíram que o fósforo era retido por ambos os fenômenos; sorção pelas partículas de solo e a interação $P \times Al$ trocável; verificaram que a sorção superficial foi fator dominante na retenção de fósforo nestes solos somente quando o Al^{3+} era menor que 1 meq/100g. FOY & BROWN (1963) trabalhando com algodão em solução nutritiva encontraram que o efeito tóxico do alumínio sobre o algodão, cultivado em solução nutritiva, foi reduzido pelo aumento do pH e pelo aumento do conteúdo de fósforo da solução. LEAL & VELLOSO (1973), estudando latossolos sob vegetação de cerrado do planalto central, encontraram correlações significativas entre sorção de fósforo e os teores de óxidos amorfos de alumínio no horizonte A. O papel do alumínio e as relações deste e de outros elementos com a sorção de P tem sido estudado por vários autores e chegaram à conclusão da irreversibilidade do P sorvido como Al-fosfato, mesmo que posteriormente seja feita a correção da acidez através da calagem (THOMPSON, 1962 ; ADAMS & PEARSON, 1967; PRATT, 1966).

Admite-se que os teores de ferro e alumínio presentes no solo sejam os principais fatores responsáveis pela força com que o fósforo é sorvido. LINDSAY et al. (1962), e PHILEN & LEHR (1967), trabalhando com óxidos hidratados de ferro e alumínio e uma grande variedade de concentração de fósforo na solução do solo, identificaram inúmeros precipitados contendo ferro e alumínio. CHANG & CHU (1961), verifica-

ram em solos latossólicos que o fósforo foi sorvido mais fortemente, ficando retido principalmente sob a forma de fosfato de ferro. Os fosfatos de Fe e Al são mais estáveis e frequentes em solos ácidos. YUAN et al., (1960), aplicaram fosfato em três solos cujos valores de pH variaram de 5,2 a 5,7; as análises posteriores revelaram que mais de 80% do fósforo adicionado se achava em combinação com aqueles metais. HINGSTON et al. (1967, 1968) têm mostrado que ânions podem ser especificamente sorvidos por óxidos hidratados de Fe e Al. VELLOSO et al., (1982), estudando cinco solos sob vegetação de cerrado do território federal do Amapá, classificados como Latossolos Amarelos e Podzólicos Vermelho-Amarelo, encontraram que os teores de fósforo sorvido correlacionaram-se com as percentagens de oxihidróxidos de ferro e de alumínio; a média de fosfato sorvido no horizonte A desses solos chega a 1,24 moles/ 100g. Alta capacidade de sorção de fósforo não implica necessariamente alta imobilização desse elemento. JOHNSON & WILD (1982), estudando as características de sorção/dessorção de fósforo em três solos ácidos da Bahia, encontraram resultados que comprovam isso; em um solo contendo altos teores de Fe e Al, extraídos por oxalato, apresentou maior capacidade de sorver fósforo e forneceu um adequado suprimento de fósforo para as plantas; enquanto em outro solo, com altos conteúdos de Fe e Al, extraídos por ditionito, evidenciou menor disponibilidade de fósforo e alta capacidade de imobilizar esse elemento. PARFITT et al., (1975), estudando o mecanismo pelo qual ocorre a sorção do fósforo por óxidos de

ferro, chegaram a conclusão que essa sorção ocorre devido a uma substituição dos íons hidroxila pelo íon fosfato; para que isto ocorra, é necessário uma quebra da ligação entre o íon hidroxila e o íon Fe^{3+} . Em razão disso, essa troca ocorre muito lentamente e é provável que reações similares ocorram entre gibsita, alofana e espécies hidroxil-alumínio.

Existem evidências de que a matéria orgânica pode diminuir ou aumentar a habilidade do solo para sorver fósforo. Muitos pesquisadores tem encontrado que a matéria orgânica em associação com cátions, tais como Fe^{3+} , Al^{3+} e Ca^{2+} , pode sorver fósforo (RENNIE & MCKERCHER, 1959; HARTER, 1969; HINGA, 1973; LOPEZ-HERNANDEZ & BURNHAM, 1974; HOLFORD & MATTINGLY, 1975). A matéria orgânica afeta as reações do fósforo no solo. HOLFORD & MATTINGLY (1975), encontraram que em solos calcáreos a matéria orgânica compete com o fósforo pelo mesmo sítio de sorção na superfície do CaCO_3 . MORENO et al. (1960), mostraram que a matéria orgânica pode complexar íons cálcio e deste modo aumentar a concentração de fósforo na solução do solo. WEIR & SOPER (1963), chegaram à conclusão que a adição de esterco em solos calcáreos reduziu a energia de ligação do fósforo do solo, mas aumentou a sorção máxima. Em contraste, APPELT et al. (1975), encontraram que ácidos orgânicos simples, ácidos fúlvicos e ácido húmico não possuem efeitos sobre a sorção de fósforo em solos derivados de resíduos orgânicos. No entanto, NAGARAGAH et al. (1970), encontraram que ácidos orgânicos são capazes de reduzir as quantidades de fósforo que eram sorvidas pela caulinita, gibsita e goetita.

BERTON & PRATT (1987), estudando o uso de curvas de sorção para recomendação de fósforo em solos adubados com resíduos orgânicos, chegaram à conclusão que a adição desses resíduos diminui a sorção de fósforo pelo solo, sendo as alterações proporcionais à concentração de fósforo e a quantidade adicionada dos resíduos orgânicos.

COLE et al. (1950), verificaram que a isoterma de sorção de Langmuir descreve a sorção de fósforo pelo CaCO_3 a concentrações relativamente baixas de fósforo. Quando a isoterma apresentava descontinuidade, em virtude do aumento na concentração de P, os autores sugeriram que precipitação estava ocorrendo. GRIFFIN & JURINAK (1973, 1974) estudaram a cinética da interação do fósforo com calcita e concluíram que ocorrem dois tipos de reações: (a) a primeira, ocorre a baixa concentração de fósforo e consiste da sorção do P na superfície da calcita; (b) a segunda, é descrita como o processo de nucleação dos cristais de fosfato de cálcio, ocorrendo, desta forma, um rearranjo na superfície dos cristais de fosfato amorfo dentro do heteronúcleo, os quais influencia o crescimento do cristal.

HOLFORD & MATTINGLY (1975), estudando a sorção de fósforo em 24 solos calcáreos, chegaram à conclusão que a alta energia de sorção superficial está estreitamente relacionada com ferro extraído pelo ditionito, o que indica que, em solos calcáreos, óxidos hidratados são importantes na sorção do fósforo; verificaram também que a baixa energia de sorção está altamente correlacionada com a área de superfície do

CaCO_3 e conteúdos de matéria orgânica, mas não com o conteúdo de CaCO_3 . Estes resultados sugerem que o fósforo é menos fortemente ligado ao CaCO_3 do que a óxidos hidratados e tende a ser mais disponível às plantas nesta forma.

O pH do solo afeta a disponibilidade do fósforo aplicado ao influenciar a natureza das reações. Em condições naturais a maioria dos solos brasileiros são ácidos e sua fração argila é dominada por minerais de carga variável ou dependente do pH. O aumento do pH induz a um aumento de cargas negativas, promovendo maior repulsão dos ânions fosfatados solúveis pelas superfícies dos colóides, resultando em menor sorção desses ânions (GOEDERT & SOUZA, 1986).

Solos ácidos fixam grandes quantidades de fósforo. Muitas vezes a aplicação direta da rocha fosfatada é mais eficaz e econômica do que a aplicação de fosfato solúvel, uma vez que as rochas fosfatadas são reativas em solos ácidos. A eficiência do uso direto da rocha fosfatada depende da sua solubilidade, do tempo de reação e do pH do solo (SANCHEZ & UEHARA, 1980). Com relação ao pH em ultissolos da Carolina do Norte, a eficiência da rocha fosfatada aumenta drasticamente quando o pH do solo diminui para 5,2 (BARNES & KAMPRATH, 1975).

KAFKAFI et al., (1988), com o objetivo de acrescentar informações sobre sorção de fósforo, nas suspensões de montmorilonita e caulinita, quando determinada pela força iônica, chegaram à conclusão que quanto maior esta, maior era a sorção de fósforo na superfície das argilas cauliníticas e

montmoriloníticas; verificaram ainda que o principal efeito ocorria entre 0,2 e 5dS/m. LEAL & VELLOSO (1973), estudando latossolos sob vegetação de cerrado, chegaram à conclusão que o pH foi o fator que influenciou de maneira marcante a sorção máxima desses solos e observaram que esta diminuía à medida que o pH se elevava.

A fração argila exerce um papel ativo na sorção do fósforo. Isto foi constatado por RAMENDRA et al., (1983), quando estudaram as características de sorção de fósforo em solos podzólicos, latossolos, terra roxa estruturada, glei pouco húmico e solos aluviais da região tropical úmida da Amazônia; observaram que a fração argila, onde predomina caulinita com óxidos e oxidróxidos de ferro e alumínio como acessórios, exerce papel ativo na sorção do fósforo.

HOLANDA & MEDEIROS (1984), estudando solos representativos do Estado do Rio Grande do Norte, classificados como bruno não cálcico, podzólico, latossolo, litólico e vertissolo, observaram que solos que apresentavam elevados teores de argila, como o vertissolo, foram os que apresentaram o mais alto valor de sorção máxima; a influência do teor de argila também foi evidenciada quando se compara os dados de sorção dos horizontes A e B dos solos bruno não cálcico cujos valores de sorção no horizonte B foram aproximadamente o dobro dos valores do A. SÁ JUNIOR et. al., (1968), observaram que a sorção de fósforo em solos da zona da mata de Pernambuco era fortemente influenciada pelo teor de argila do solo. VELLOSO et al., (1982), estudando cinco solos, dos quais quatro clas-

sificados como latossolos amarelos, podzólicos e um como podzólico vermelho-amarelo, tendo a caulinita como o mineral silicatado predominante na fração argila, observaram que o fósforo sorvido foi altamente correlacionado com o teor de argila dos solos; a contribuição da caulinita na sorção de fósforo se situou em torno de 0,2 a 0,7mmol de fosfato sorvido/100g de solo, indicando que nestes solos, os oxi-hidróxidos de ferro e óxidos amorfos de alumínio contribuem para a maior parte do fosfato sorvido.

O tipo de cátion presente no mineral argila influencia de forma diferenciada a sorção de fósforo. KURTZ (1953), em sua revisão de fósforo em solos ácidos e neutros, cita que argilas saturadas com cálcio retêm mais fósforo do que argilas saturadas com Na^+ , NH_4^{++} ou K^+ . PISSARIDES et al., (1968), estudando a sorção de fósforo por caulinita, illita e montmorilonita saturadas com vários cátions, encontraram que, a baixas concentrações, o fósforo, independente do cátion, era sorvido de acordo com a isoterma de Langmuir; as argilas saturadas com íons divalentes sorviam mais fósforo do que as argilas saturadas com íons monovalentes; os resultados sugeriram que a espessura da dupla camada difusa controlava a sorção de fósforo na superfície da argila. KAFKAFI et al., (1988), estudando a sorção de fósforo pela caulinita e montmorilonita, encontraram que a sorção era maior em argilas que continham cálcio do que em argilas que continham K. HASEMAN et al. (1950), reagiram solução 1,0M de fósforo (como NH_4^- , K^- , ou Na-fosfato) com illita, caulinita e montmorilonita e

encontraram precipitados constituídos por fosfatos de Fe e Al que continham cátions da solução de fósforo.

Diversos autores consideram que o mecanismo de sorção é o mesmo para os diversos tipos de argila. WILD (1950), concluiu que argilas montmoriloníticas e cauliníticas, com partículas de igual tamanho, retém similar quantidade de fósforo. MULJADI et al., (1966a, 1966b, 1966c), concluíram que a sorção de fósforo era a mesma na caulinita, gibsitita e pseudo-boemita, diferindo somente no número de sítios de sorção; a sorção ocorria principalmente a baixa e média concentração de P, enquanto que em altas concentrações as reações de precipitação e dissolução ocorriam com a formação de uma nova fase. LOW & BLACK (1948, 1950), concluíram que altas concentrações de P-fertilizante na solução do solo dissolve caulinita e libera Si e Al, com subsequente precipitação de compostos Al-fosfatados; em concentrações mais diluídas a reação pode ser de sorção com a troca da hidroxila por íon fosfato.

O tempo é um importante fator que controla as reações do fertilizante fosfatado com o solo, sendo que, dependendo da sua natureza, o equilíbrio pode ser estabelecido em um maior ou menor período de tempo.

KAFKAFI et al. (1988), estudando a sorção de fósforo pela caulinita e montmorilonita, observaram que a concentração de fósforo na solução de equilíbrio foi estabilizada após um período de 24-48 horas após a introdução do elemento no sistema. Em um período de sete dias, a caulinita mostrou uma redução linear na concentração de P da solução e apresentou

uma mudança muito pequena entre 2 a 4 dias, indicando que o tempo de 48 horas de equilíbrio representa, relativamente, uma condição de estabilidade; para a montmorilonita a concentração mais estável foi alcançada em torno de 2 a 4 dias de equilíbrio e a maior mudança na concentração, verificada entre 1 a 4 dias, provavelmente refletiu a variabilidade no próprio experimento. SAMPLE & COPELAND (1972), fizeram uso da equação de Langmuir com o objetivo de padronizar o estudo da sorção de fósforo em quatro solos com tempo de equilíbrio de quatro horas a 12 dias; usaram concentrações de P variando de 0-10ppm e soluções de sais preparadas com e sem CaCl_2 0,01M; a sorção máxima na mais alta concentração foi duas vezes aquela obtida em concentrações baixas. A sorção de fósforo nas soluções preparadas com CaCl_2 0,01M apresentou sorção máxima quase duas vezes maior do que aquela obtida com solução aquosa.

2.3 - Mecanismos de sorção do fósforo

Quando fósforo é adicionado ao solo uma sequência complexa de reações ocorrem e os produtos formados são usualmente muito menos acessíveis às plantas do que o fosfato contido originalmente nos fertilizantes.

O processo pelo qual o fósforo é sorvido ainda se encontra bastante controvertido, portanto pendente de uma de-

finição. Muitos trabalhos de pesquisa já foram desenvolvidos com o intuito de tentar uma diferenciação entre os efeitos de Fe e Al no processo de sorção de P. O íon fosfato se combina praticamente com Fe e Al para formar sais definidos. LINDSAY et al. (1962), encontraram cerca de 30 compostos fosfatados cristalinos, além dos coloidais, como produtos da reação de vários fosfatos com componentes do solo. MULJADI et al. (1966), sugeriram a existência de três regiões relacionadas com a afinidade de fósforo com pelo menos três sítios relativos energeticamente diferentes. Eles sugeriram que o mecanismo para sorção nas regiões I e II era definido pela substituição do grupo OH, associado com uma carga positiva do átomo de Al, pelo fosfato. A reação de sorção na região III é considerada como um resultado da penetração do P na região cristalina do mineral de argila. Para todas as regiões o fosfato ligado a caulinita era reversível com respeito ao pH. PARFITT et al. (1975) usaram técnica de espectroscopia infravermelha com o objetivo de obter um modelo estrutural da reação de superfície entre óxidos de ferro e íons fosfato; os autores chegaram à conclusão que dois íons hidroxilas na superfície são substituídos por um íon fosfato. Dois átomos de oxigênio do íon fosfato são coordenados para dois íons Fe^{2+} , resultando numa complexa superfície do tipo $Fe-O-P(O_2)-O-Fe$. Tendo-se em vista que duas fortes ligações necessitam ser quebradas, a troca do fosfato sorvido com a solução deve ser muito baixa, como tem sido constatada para a goetita. É provável que reações similares ocorram com gibsit, alofana e

espécies hidróxi-alumina. HASEMAN et al. (1950), mostram dois estágios na sorção de fósforo por íons hidroxilados nas superfícies de partículas do solo. O primeiro estágio resulta em um fósforo instável ou fosfato superficial, que se encontra em equilíbrio com o P^{32} . O segundo estágio do processo de sorção é mais lento e pode ser observado quando uma grande quantidade de P é aplicada ao solo, acarretando uma precipitação de fosfatos insolúveis de Al e Fe. FREEMAN & ROWELL (1981), estudaram a sorção e precipitação do fosfato sobre calcita; a análise revelou que o fosfato dicálcico (DCP) é formado rapidamente e, muda lentamente, para fosfato octocálcico (OCP); difrações de raio-X mostram que o DCP e o OCP estão presentes, com o DCP predominando; a capacidade de troca do P retido é nula quando pequenas quantidades estão envolvidas (0-10 µg P/g calcita) e, chega a 30%, quando são grandes as quantidades (200-1000 µg P/g calcita).

MATTINGLY (1975), discutiu as reações entre íons ortofosfato sobre o carbonato de cálcio e óxidos hidratados e as relações entre o fosfato lábil e solúvel nos solos. Os resultados de sorção sobre o carbonato de cálcio mostraram que quase todo o fosfato sorvido em baixas concentrações era rapidamente trocável com P^{32} na solução, enquanto que menos de um terço do fosfato sorvido em altas concentrações era isotopicamente trocável. A sorção de fosfato sobre carbonato de cálcio puro, ou pedra calcária, segue a isoterma de Langmuir até 9 mg P/l, acima dessa concentração há evidência de precipitação, provavelmente do DCPD (COLE et al. 1953).

Isto explica porque em altas concentrações muito pouco fosfato é permutável com o P^{3-} da solução. HOLFORD & MATTINGLY (1975), concluíram que a sorção do fosfato sobre carbonato era devido a: (i) uma reação química de sorção numa concentração final de P abaixo de 0,5mg/l; (ii) uma sorção física com uma baixa energia de ligação, e (iii) precipitação provavelmente como OCP; as reações entre carbonato de cálcio e íons fosfato são cinéticas e grande parte do fosfato é sorvido rapidamente sobre a superfície como uma monocamada. A reação de sorção do íon ortofosfato com óxidos hidratados ocorre da seguinte forma: no composto $-Fe_2O_3$, seis átomos de oxigênio são agrupados octaetricamente ao redor de cada átomo de ferro; a superfície do óxido adquire uma carga negativa ou positiva na solução aquosa pela sorção dos íons H^+ ou OH^- , deste modo os íons Fe^{3+} possuem cargas sobre a superfície, movimentam-se na região determinando o potencial dos íons.

A sorção específica de ânions sobre a superfície dos óxidos segue a equação de Langmuir e há uma sorção máxima em qualquer pH (MATTINGLY, 1975). A sorção específica do ânion também envolve a formação de complexa coordenação com a superfície do óxido. HINGSTON et al. (1974), estudaram a des-sorção de ânions, incluindo fosfato, da superfície da goetita e gibsitita pela substituição da solução adsorvente com uma solução de mesmo pH e força iônica, mas não contendo fosfato. A dessorção de ânions variou entre completa reversibilidade e completa irreversibilidade e cessa quando a carga sobre a superfície alcança seu valor original.

MURRMANN & PEECH (1969), mostraram que a adição de pequenas quantidades de DCPD e DCP aumentou os conteúdos de P lábil e solúvel nos solos que permaneceram com baixa saturação de ambos os compostos. KAFKAFI et al. (1988), estudaram o efeito de diferentes exudatos das raízes sobre a dessorção de fósforo de argilas saturadas com K e Ca; a tendência dos dados mostrou que a competição entre o ácido oxálico e o P é aumentada quando o pH diminui. LOPEZ-HERNANDEZ et al. (1986), reportaram a existência de uma forte competição do ácido oxálico com o fosfato sobre sítios de sorção da superfície dos óxidos dos solos tropicais.

2.4 - Determinação da capacidade tampão do fósforo

Capacidade tampão de fósforo refere-se à habilidade do fósforo da solução do solo em resistir à mudanças quando o fósforo é adicionado ou removido do solo. Isto pode ser considerado como uma das mais importantes características do solo, visto que caracteriza as relações dinâmicas entre o fósforo lábil da fase sólida e o fósforo da solução de onde a planta retira os nutrientes essenciais ao crescimento.

A demonstração de que os fatores intensidade e quantidade exercem importante papel na disponibilidade do fósforo para as plantas tem sido útil no esclarecimento de alguns aspectos da capacidade de suprimento de P dos solos (WILLIAMS,

1967; OLSEN & WATANABE, 1957). A capacidade tampão pode ser controlada por processo de sorção/dessorção (HOLFORD & MATTINGLY, 1976) e ou processos de precipitação/dissolução (MURMANN & PECH, 1969). A capacidade tampão de fósforo é medida pela declividade da isoterma de Langmuir, e é alterada conforme a concentração deste na solução do solo.

Vários autores têm sugerido índices para expressar a capacidade tampão. Os seguintes índices de tamponamento de fósforo foram determinados por isotermas de sorção: (a) MBC (Maximum buffer capacity): capacidade tampão máxima; inclinação máxima da isoterma de Langmuir para duas superfícies de sorção (HOLFORD & MATTINGLY, 1976); (b) mBC (Maximum buffer capacity): capacidade tampão máxima; inclinação máxima da isoterma de Langmuir para uma única superfície de sorção, dada pela expressão $(dx/dc)_{c \rightarrow 0} = Kxm$; (c) BI (Buffering Index): índice de tamponamento; inclinação máxima da isoterma de Langmuir, para uma única superfície, em concentração de equilíbrio de $0,5 \mu\text{gP/ml}$; (d) EBC (Equilibrium buffer capacity): capacidade tampão de equilíbrio; valor da tangente à isoterma de Langmuir, para uma única superfície de sorção, na concentração natural de equilíbrio (quando o P adicionado é igual a zero) e é obtido pela primeira derivada da equação da isoterma de Langmuir na sua forma original (BECKETT & WHITE, 1964, e HOLFORD & MATTINGLY, 1976); (e) SBC (Standardized buffer capacity): capacidade tampão padronizada; inclinação da tangente da isoterma de sorção de Langmuir em uma concentração de equilíbrio de $0,3 \mu\text{gP/ml}$ (OZANNE & SHAW 1968); (f) ST (Sorp-

tion test) : teste de sorção; quantidade de fósforo sorvido quando a concentração de equilíbrio está em torno de $0,3\mu\text{gP/ml}$ (OZANNE & SHAW, 1967); (g) SI (Sorption index): índice de sorção; quantidade de fósforo sorvido de $3\mu\text{gP/ml}$ (ou $620\mu\text{gP/g}$ solo), de fósforo adicionado (BACHE & WILLIAMS, 1971).

A existência desse grande número de índices que expressam o tamponamento do solo tem-se constituído num contínuo problema nas medidas de capacidade tampão, tendo-se em vista a não existência de pesquisas para avaliar ou comparar esses índices. BACHE & WILLIAMS (1971), assumiram um fundamento teórico de que a inclinação da isoterma em 10^{-4} M de fósforo era a melhor representação das propriedades de sorção dos solos e, usando esse valor como um índice de referência avaliaram outros índices de sorção. No entanto uma avaliação pode ser feita sobre o claro entendimento da função da capacidade tampão em relação ao comportamento do fósforo no solo. OZANNE & SHAW (1968), BARROW & SHAW (1976), e HOLFORD (1976, 1980), têm tentado o uso da capacidade tampão de fósforo, que delinea a relação entre as mudanças no fósforo sorvido, e a atividade ou concentração do fosfato na solução, para explicar a variabilidade do fosfato nas análises entre os solos. Um teste de solo bem sucedido pode, quando muito, dar valores de medida ou índice da quantidade de fósforo disponível para a planta durante um período de crescimento. Isso pode entretanto simular o sistema radicular da planta por extrair uma quantidade de fósforo que é uma função direta da quantidade

de fósforo lábil, mas uma função inversa do tamponamento, ou seja, o tamponamento do fósforo pode ter o mesmo efeito sobre a extração do fósforo lábil pelo teste de solo como sobre a-
quele absorvido pela planta.

A capacidade de tamponamento máxima de fósforo é uma característica inerente dos solos. Alguns autores (OZANNE & SHAW, 1968; BARROW & SHAW, 1967; e HOLFORD, 1976) observaram que a capacidade tampão de fósforo ou capacidade tampão máxima de fósforo do solo afeta a quantidade de fósforo dessorvido por NaH-CO_3 ou $\text{NH}_4\text{F-HCl}$. KUO et al. (1988), trabalharam com sete solos ácidos, enriquecidos com quantidades variadas de fósforo, com o objetivo de determinar quais parâmetros do solo têm um maior controle sobre a dessorção de fósforo quando são usados NaHCO_3 ou $\text{NH}_4\text{-F-HCl}$ como extratores, bem como estimar a quantidade de fósforo sorvido em relação às quantidades de fósforo dessorvido pelos extratores. O fósforo recuperado pelos extratores, definido como a proporção entre quantidade de fósforo extraída e a quantidade adicionada, não teve uma relação estreita com a capacidade tampão máxima de fósforo desses solos. Em constraste, a capacidade de sorção de fósforo desses solos estimada pela clássica equação de Langmuir, foi significativamente relacionada com o fósforo recuperado. MENDOZA & BARROW (1987), encontraram resultados semelhantes. Também foi observado uma baixa correlação entre a constante de afinidade da equação de Langmuir (K) e o fósforo recuperado, podendo isto explicar o fracasso da capacidade tampão máxima para adequadamente descrever a dessorção de

fósforo pelos extratores do solo.

HOLFORD & MATTINGLY (1976b), tem demonstrado que a rapidez com que as plantas podem retirar o fósforo do reservatório lábil é negativamente relacionada com a energia de ligação e capacidade tampão do solo. Consequentemente, a proporção de fósforo lábil que pode ser disponível para a absorção da planta por unidade de tempo pode também ser negativamente relacionada ao tamponamento de fósforo.

O cátion presente no solo influencia a solubilidade do fósforo. Solos holandeses equilibrados com uma solução de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ apresentaram uma baixa concentração de fósforo solúvel do que quando equilibrado com uma solução de NaNO_3 (LEHR & WASEMAL, 1952). Esse efeito foi maior com solos arenosos do que com solos argilosos. A igual força iônica e similar concentração de cloro, as quantidades de fósforo sorvido por solos da Nova Zelândia são maiores quando equilibrados com CaCl_2 do que com NaCl (RYDEN & SYERS, 1975). BARROW (1984), reportou que o fósforo era mais sorvido na presença de CaCl_2 do que na de NaCl por um solo com o mesmo pH inicial de 4,0.

LEHR & WASEMAL (1952), encontraram que o efeito do sódio no aumento da solubilidade do fósforo, quando comparado com cálcio, era mais pronunciado sobre solos arenosos do que em solos argilosos; em tais solos, onde a capacidade tampão de fósforo é baixa, uma concentração de fósforo na solução do solo em torno de $0,2\mu\text{g/l}$ tem-se mostrado ótima para o crescimento de gramíneas e leguminosas (FOX & KAMPRATH, 1970; DE CARVALHO et al. 1980).

Os fatores do solo que afetam diretamente a absorção de P pelas plantas foram estudados por GUNARY & SUTTON (1967); estes autores chegaram à conclusão que os mais atuantes são: (a) a quantidade de P do solo (o fator quantidade); (b) a taxa de suprimento de fósforo da fase sólida para a solução do solo (relacionada com as características de tamponamento do solo); (c) a concentração de fósforo na solução do solo (fator intensidade), e (d) a difusão de P em direção às raízes (fator difusão).

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Solo

Nove solos representativos do Estado do Ceará, coletados das chapadas da Ibiapaba, Apodi, Araripe e do Maciço de Baturité, foram usados no presente estudo. De acordo com as nomenclaturas do Serviço Nacional de Levantamento e Classificação de Solos (SNLCS) e da Soil Taxonomy, os solos estão classificados como: Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico (PE₁, Viçosa-CE) ou Ustults; Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LV₁, Ubajara-CE, LV₂, Ibiapina-CE, LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) ou Ustults; Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico (Pe₂, Palmácia-CE) ou Ustalfs; Cambissolo Eutrófico (Ce₂, Quixeré-CE e Ce₃, Quixeré-CE) ou Typic Camborthids e Cambissolo Eutrófico (Ce₁, Quixeré-CE) ou Oxíc Camborthids.

As amostras foram coletadas superficialmente na profundidade de 0 a 25cm e foram secas ao ar. Após a secagem, foram retiradas de cada amostra uma sub-amostra que foi passada em peneira de 2mm de diâmetro.

As características físicas e químicas dos nove solos são mostradas na TABELA 01. As análises foram realizadas de acordo com o Manual de Métodos de Análises de Solo do SNLCS

da EMBRAPA (1979).

3.2 - Procedimento Experimental de Laboratório

3.2.1 - Obtenção das isotermas de sorção

No estudo de sorção foi tomado 1g de terra fina seca ao ar (TFSA), colocados em tubos com capacidade para 50ml e adicionados 25ml de CaCl_2 0,01M contendo as seguintes concentrações: 0; 2; 3,5; 5; 8; 12; 15; e 20 ppm de fósforo na forma de KH_2PO_4 . Foi procedida a agitação durante 24 horas à temperatura de 25°C e usado como inibidor microbiano o cloroformio a 2%. Em seguida, centrifugadas a 2000rpm durante 10 minutos a fim de separar o líquido das partículas sólidas. O sobrenadante foi coletado e o fósforo determinado segundo o método de MURPHY & RILEY (1962); o fósforo sorvido foi obtido por diferença entre os níveis iniciais e finais de fósforo na solução de equilíbrio, e todas as determinações foram efetuadas com três repetições.

TABELA 01 - Algumas Propriedades Químicas e Físicas dos Solos Estudados.

SOLO	Trocáveis											
	pH	P	Ca	Mg	K	Na	H+Al	Al	C	N	MO	Arg.
		ppm	----- meq / 100g -----								----- % -----	
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₁) (Viçosa - CE)	4,6	3,9	0,4	0,4	0,06	0,11	2,4	0,9	0,6	0,05	1,08	6,3
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₁) (Ubajara - CE)	4,4	3,9	0,4	0,2	0,13	0,09	3,3	1,2	0,9	0,06	1,67	18,9
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₂) (Ibiapina - CE)	4,9	5,5	0,5	0,2	0,53	0,11	3,1	1,0	0,8	0,06	1,43	26,8
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₃) (Crato - CE)	4,3	1,4	1,0	0,0	0,08	0,09	6,2	2,2	0,7	0,11	1,30	41,5
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₄) (Crato - CE)	4,9	3,1	1,0	0,0	0,11	0,10	6,3	2,2	0,9	0,10	1,60	49,2
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₂) (Palmácia - CE)	4,8	1,4	0,7	0,0	0,07	0,06	0,1	0,0	0,9	0,07	1,53	25,7
Cambissolo Eutrófico (Ce ₁) (Quixeré - CE)	6,8	2,0	3,1	0,5	0,18	0,10	0,6	0,0	0,4	0,03	0,72	28,0
Cambissolo Eutrófico (Ce ₂) (Quixeré - CE)	7,3	11,0	7,4	0,2	0,39	0,08	0,0	0,0	1,3	0,11	2,31	16,0
Cambissolo Eutrófico (Ce ₃) (Quixeré - CE)	7,1	2,0	6,2	0,4	0,57	0,06	0,0	0,0	0,7	0,08	1,26	36,0

3.2.2 - Determinação do índice de tamponamento dos solos

O índice de capacidade tampão, derivado dos dados obtidos das isothermas de sorção, foi o seguinte: capacidade tampão máxima determinado pela inclinação máxima da isoterma de Langmuir, para uma única superfície de sorção, segundo a expressão (HOLFORD & MATTINGLY, 1976): $(dX/dC)_{c \rightarrow \infty} = KX_m$. Explicitamente, KX_m , que servirá de índice de tamponamento, representa o potencial máximo de capacidade de sorção de fósforo do solo e é obtido a partir da derivação da equação de Langmuir:

$$X = \frac{K X_m C}{1 + KC} \quad (1^*)$$

Cálculo da derivada:

$$\frac{dX}{dC} = \frac{d/dC (K X_m C) (1 + KC) - K X_m C d/dC (1 + KC)}{(1 + KC)^2}$$

$$\frac{dX}{dC} = \frac{K X_m (1 + KC) - K^2 X_m C}{(1 + KC)^2}$$

$$\frac{dX}{dC} = \frac{K X_m}{(1 + KC)^2}$$

Comportamento de (1^*) :

$$A) \quad \frac{dX}{dC} > 0 \Rightarrow X \text{ (crescente)}$$

$$B) \quad X = \frac{K X_m}{1/C + K} = \lim_{c \rightarrow \infty} X = X_m$$

$$c) \lim_{c \rightarrow \infty} \frac{dX}{dC} = K X_m$$

3.2.3 - Determinação da Capacidade de Sorção Máxima de Fósforo

Na determinação da sorção máxima (X_m), e da constante de energia de sorção de fósforo (K), utilizou-se a equação de Langmuir na sua forma linear:

$$X = \frac{K X_m C}{1 + KC} \quad (2^*) \quad \text{onde:}$$

X = quantidade de P sorvido ($\mu\text{g/g}$ de solo)
 K = constante relacionada com a energia de retenção entre sorvente e sorvido ($\text{ml}/\mu\text{g P}$)
 X_m = sorção máxima ($\mu\text{g P/g}$ de solo)
 C = concentração de fósforo na solução de equilíbrio dada em $\mu\text{g P/ml}$.

Transformação linear da equação de Langmuir:

$$\begin{aligned} X = \frac{K X_m C}{1 + KC} & \Rightarrow \frac{1}{X} = \frac{1 + KC}{K X_m C} \Rightarrow \frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{K X_m C} \\ \Rightarrow \frac{C}{X} & = \left(\frac{1}{X_m}\right) C + \frac{1}{K X_m} \quad \text{fazendo: } Y = \frac{C}{X}; \quad x = C; \\ b = \frac{1}{X_m} \quad \text{e} \quad a & = \frac{1}{K X_m} \quad \text{temos que } \frac{C}{X} = \frac{1}{K X_m} + \frac{1}{X_m} C \end{aligned}$$

Para estimar a sorção máxima (X_m) e a constante de energia de sorção de P (K) procedeu-se a uma análise de regressão linear com os dados experimentais de cada solo, adaptados à equação de Langmuir na sua forma linear.

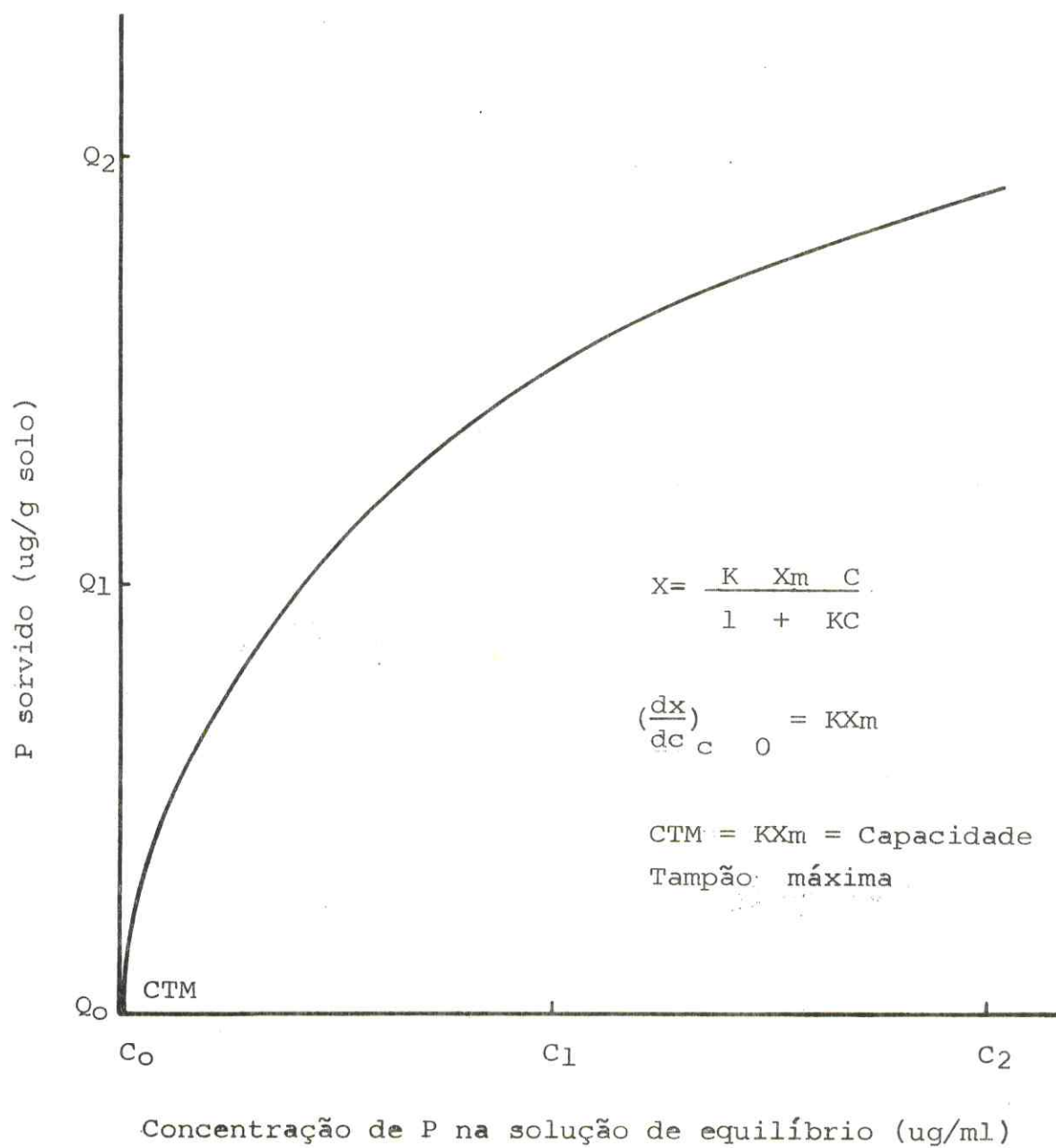


Fig. 1. Ilustração gráfica da curva característica de sorção de P usada para determinação da capacidade tampão máxima do solo.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Fósforo sorvido pelos solos

Os resultados do estudo de sorção e capacidade tampão dos solos podem ser vistos nas TABELAS 02 e 03 onde constam as concentrações de fósforo na solução final após um período de 24 horas de equilíbrio, bem como os valores de P sorvido; estes resultados são ilustrados graficamente nas FIGURAS 02 a 10, onde são mostradas as isotermas de sorção destes solos usando a equação de Langmuir para uma única superfície de sorção.

Como consequência das diferenças nas propriedades dos solos, observamos grandes diferenças no fósforo sorvido pelos solos; de acordo com os resultados da TABELA 03, o latossolo (LV₃, Crato-CE) foi o que mais sorveu fósforo, e isto pode ser atribuído aos elevados teores de argila e Al trocável existentes nestes solos (TABELA 01); o podzólico (PE₁, Viçosa-CE) foi o que menos sorveu.

A quantidade de fósforo sorvida depende em parte do nível original deste elemento no solo, ou seja, anterior aos tratamentos; deste modo este fator tende a ter influência

marcante, visto que os níveis originais de P nos solos estudados podem ser considerados como muito baixos, como podem ser vistos na TABELA 01. CATANI (1969) afirmou que alguns solos brasileiros chegam a fixar até 2481 ppm de P, o que corresponde a 4962 Kg P/ha.

De um modo geral observamos que a medida que aumenta a concentração de fósforo adicionado, aumenta a quantidade de fósforo sorvida, contudo os aumentos verificados não conservam a mesma proporção; analisando os dados da TABELA 03, vemos que a relação entre o P sorvido e o P adicionado é maior nas baixas concentrações de fósforo adicionado; esta relação diminui à medida que aumenta a concentração de P adicionado, desta forma observa-se desvios nos pontos que determinam a curva de sorção; os pontos de inflexão das curvas de sorção variam de solo para solo, como podem ser vistos nas FIGURAS 02 a 10; esses desvios estão em função da natureza e da extensão das superfícies que estão retendo o fósforo.

Quando analisamos os solos entre si, tendo como base a relação de P adicionado/P em solução de equilíbrio, vemos que os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) foram os que apresentaram os mais baixos valores de P em solução (TABELA 02); isso poderia ser explicado principalmente pelos elevados valores de argila e alumínio nestes solos; os cambissolos (Ce₁, Quixeré-CE e Ce₃, Quixeré-CE), apresentaram valores intermediários de P na solução de equilíbrio, com exceção para o solo (Ce₂, Quixeré-CE) que apresentou um

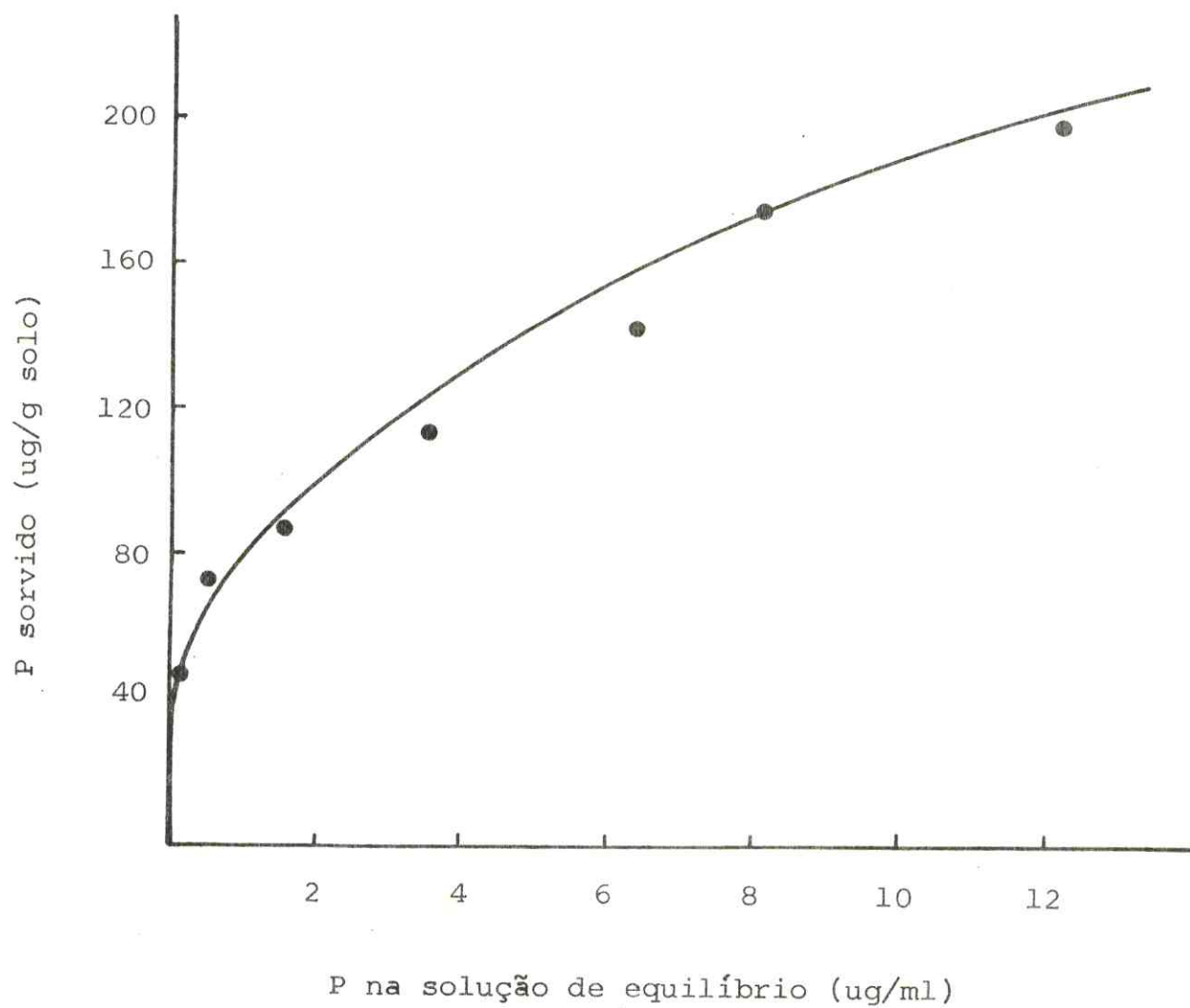


Fig. 2. Isotherma de sorção de fósforo do solo PE1 (Viçosa-CE)

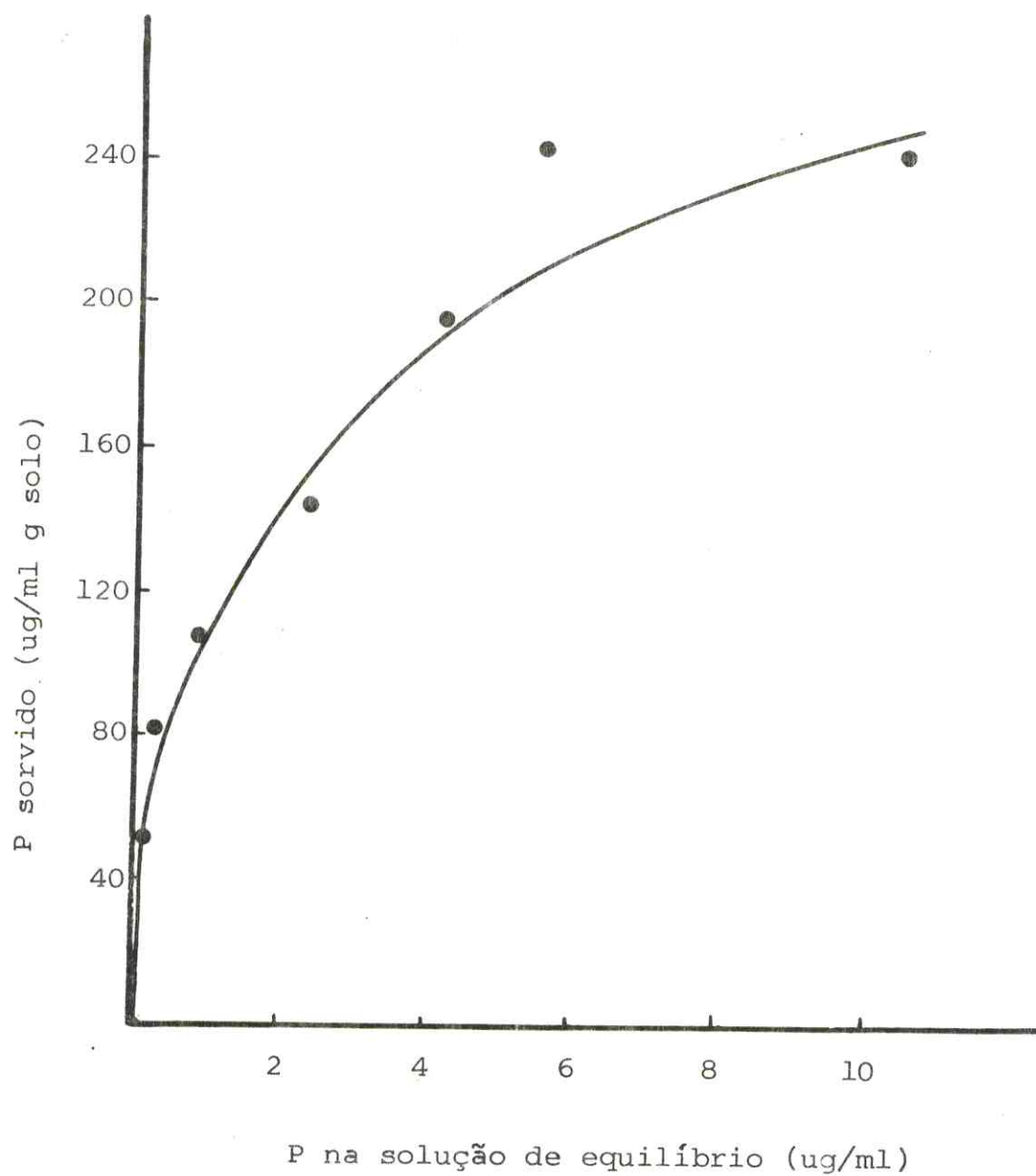


Fig. 3. Isoterma de sorção de fósforo do solo LV1 (Ubajara-CE)

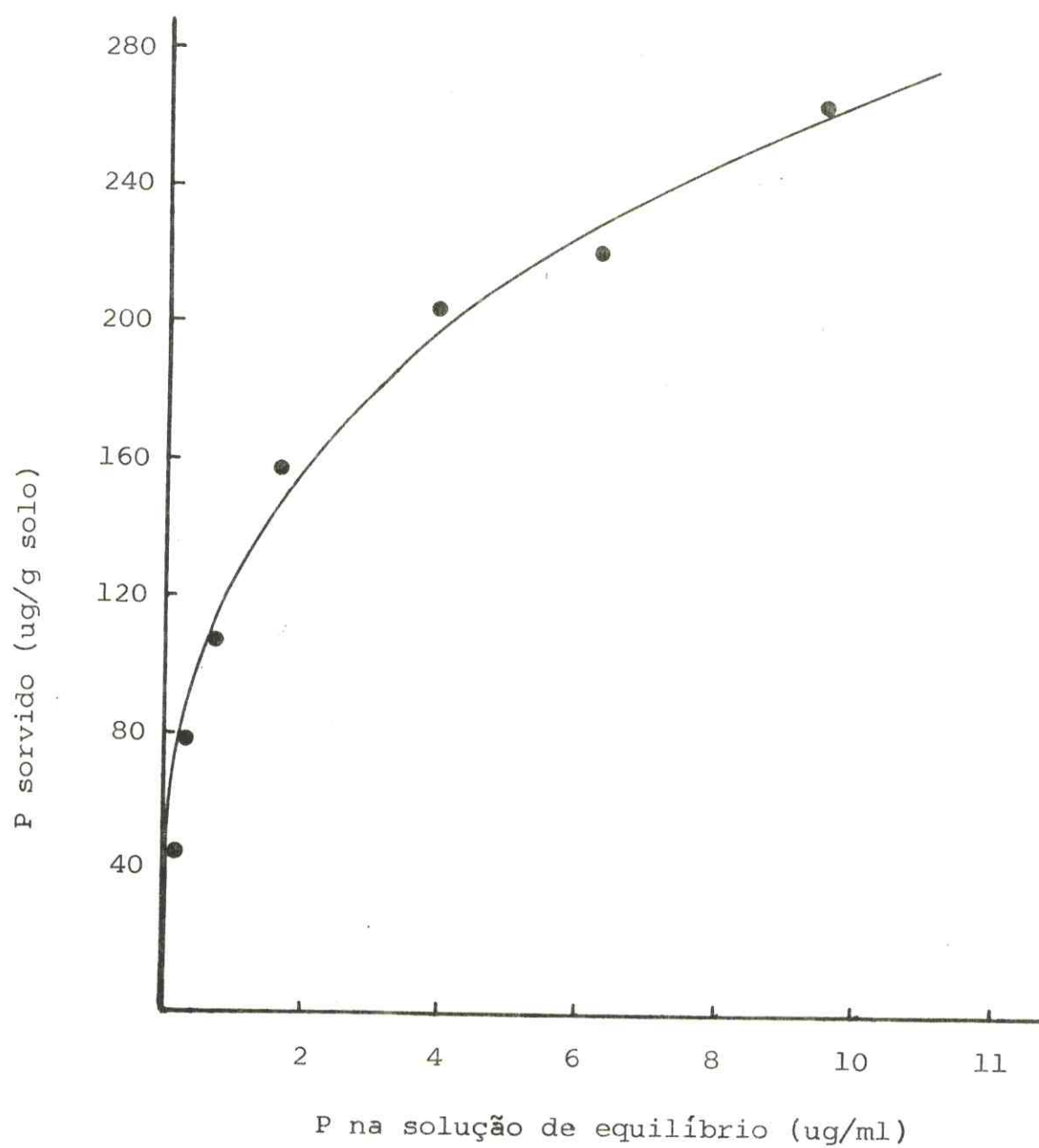


Fig. 4. Isotherma de sorção de fósforo do solo LV2 (Ibiapina-CE)

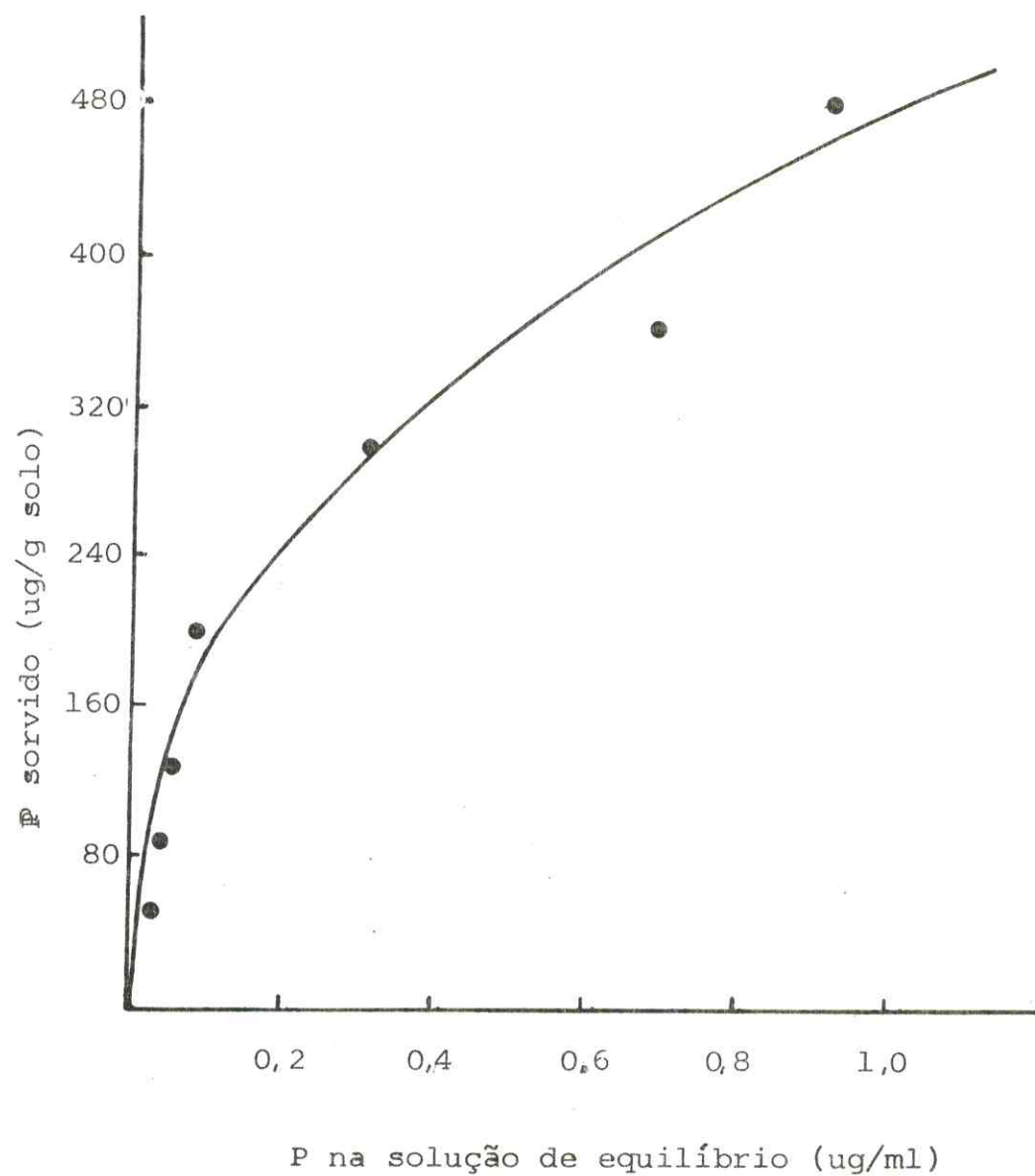


Fig. 5. Isotherma de sorção de fósforo do solo LV3 (Crato-CE)

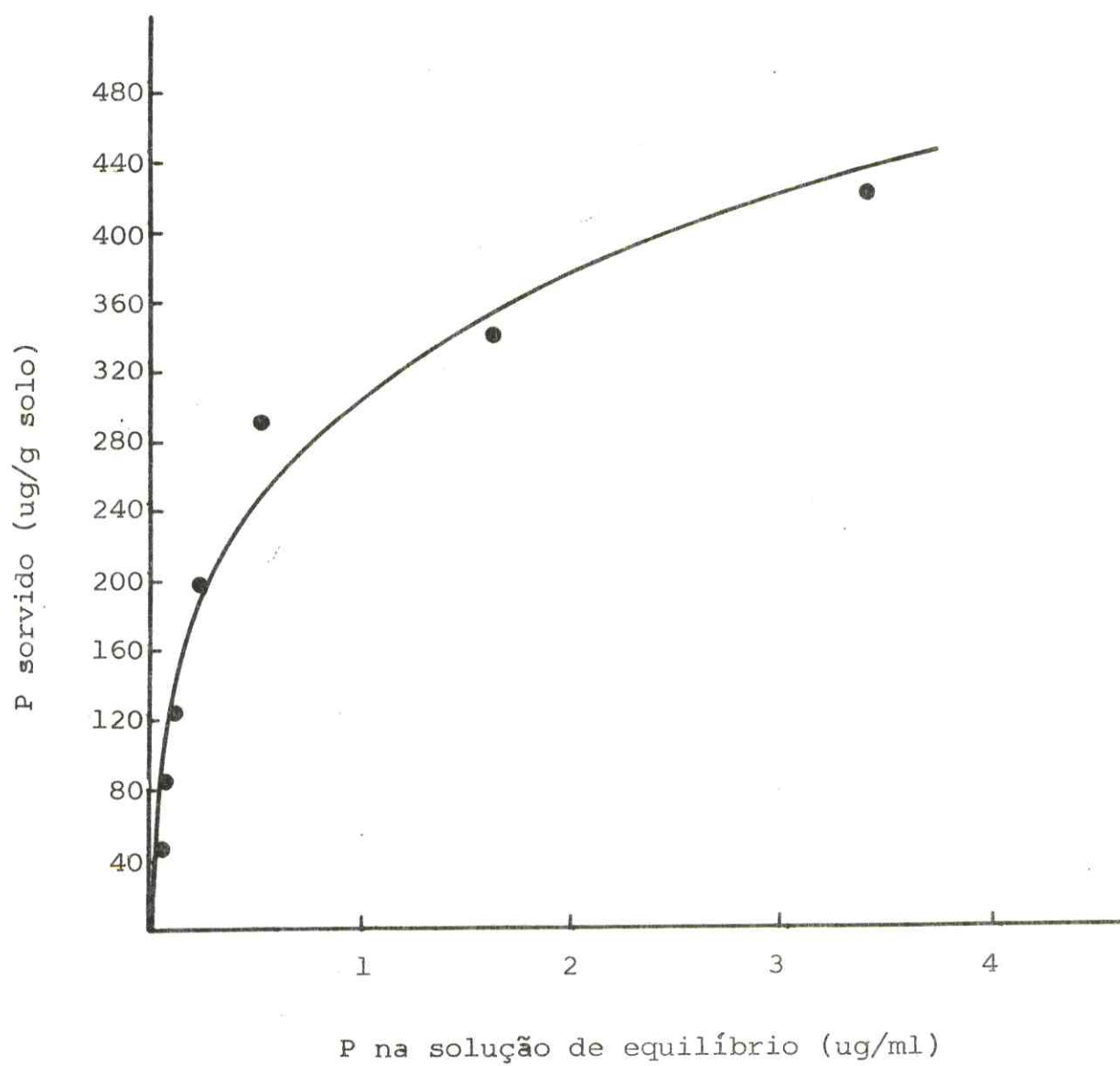


Fig. 6. Isotherma de sorção de fósforo do solo LV4 (Crato-CE)

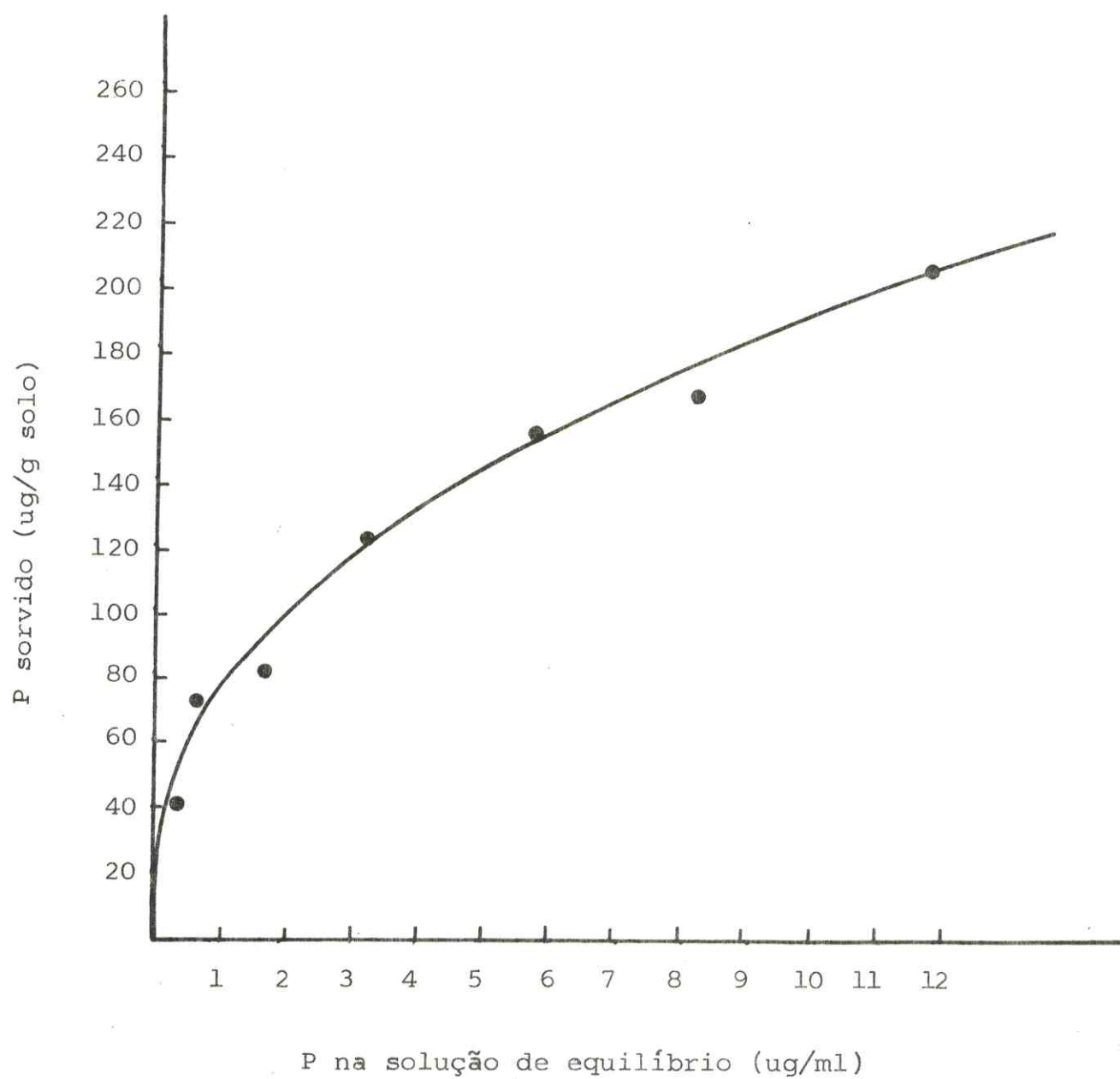


Fig. 7. Isotherma de sorção de fósforo do solo PE2 (Palmácia-CE)

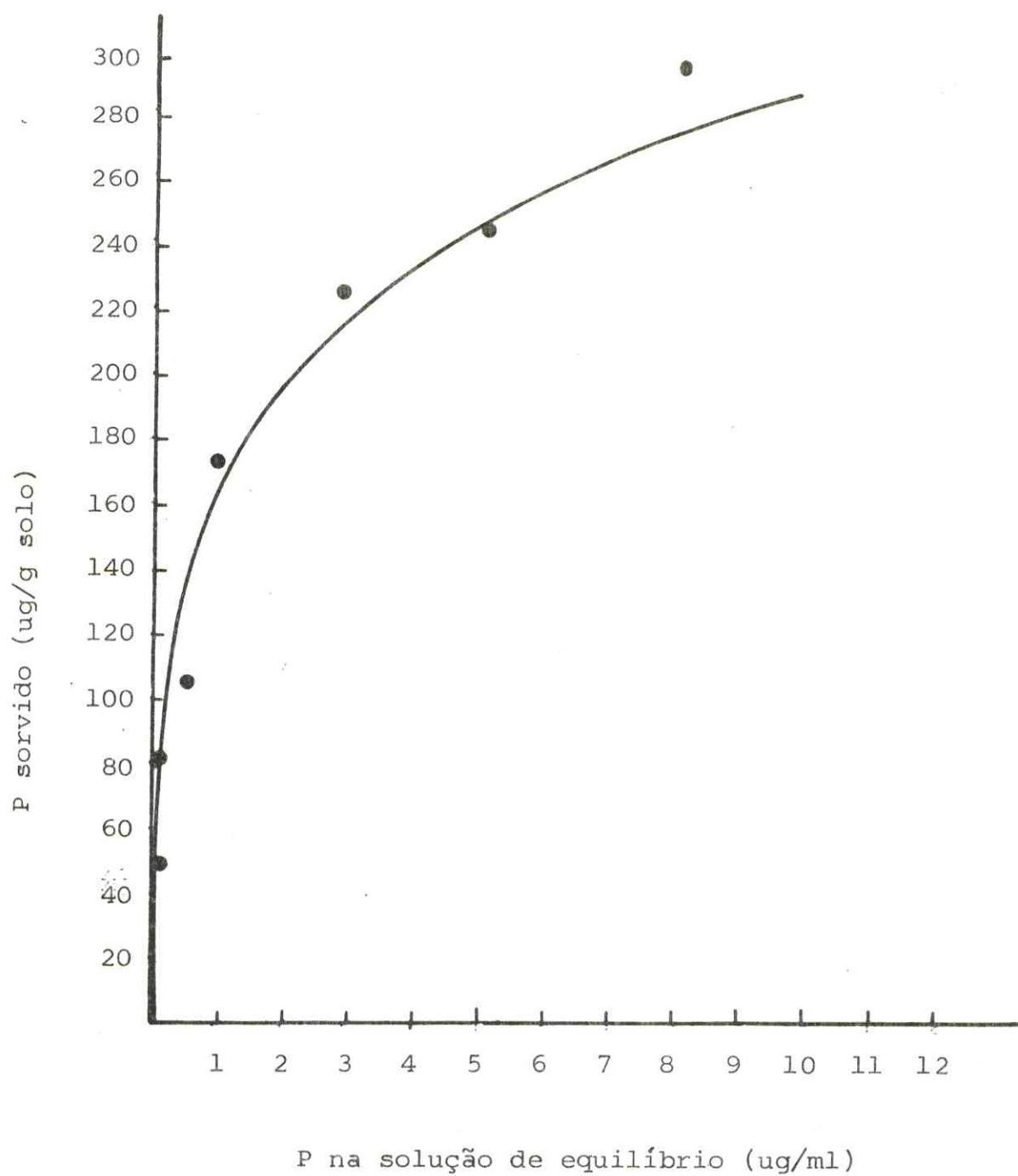


Fig. 8. Isotherma de sorção de fósforo do solo Cel (Quixeré-CE)

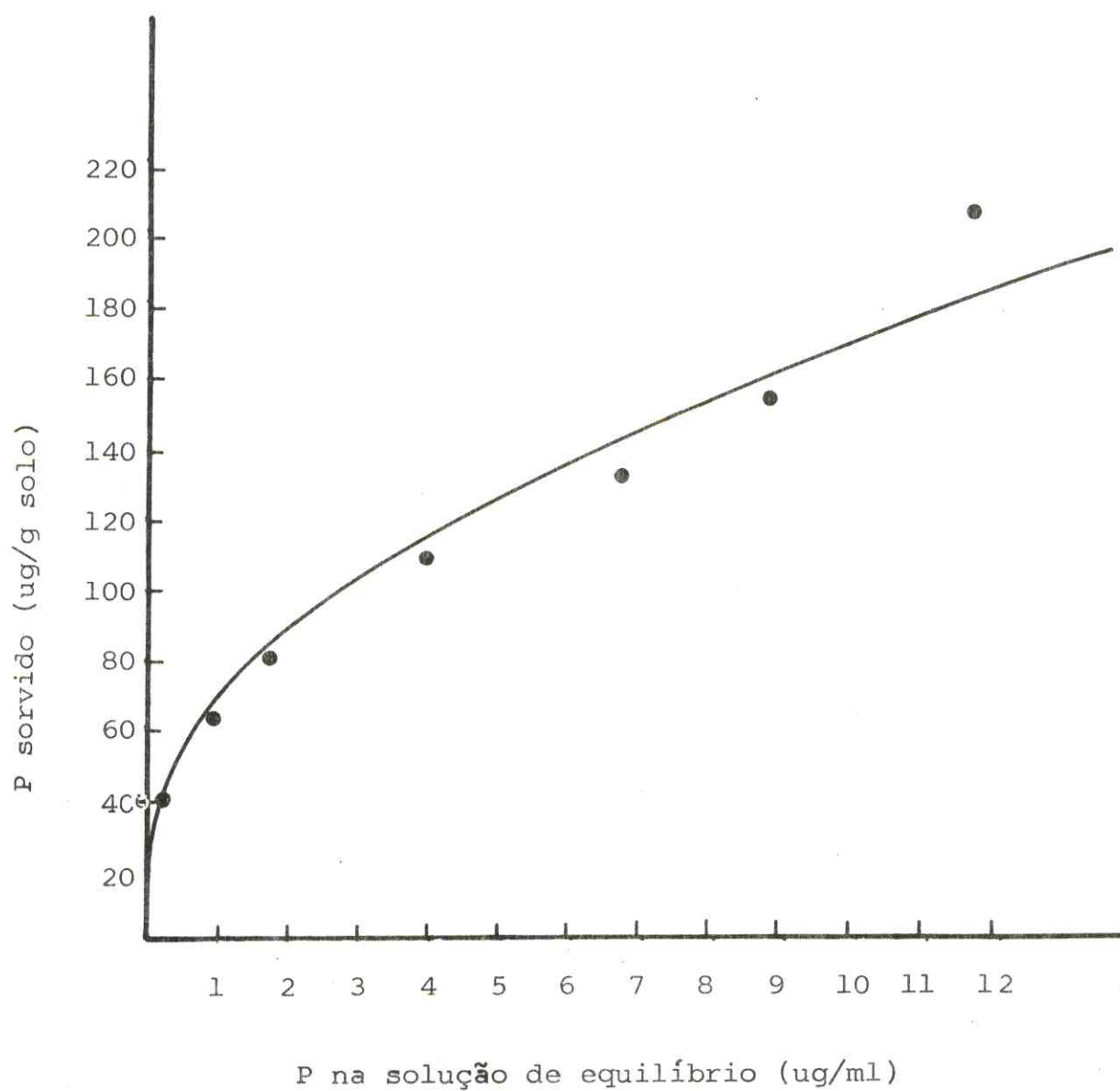


Fig. 9. Isoterma de sorção de fósforo do solo Ce2 (Quixeré-CE)

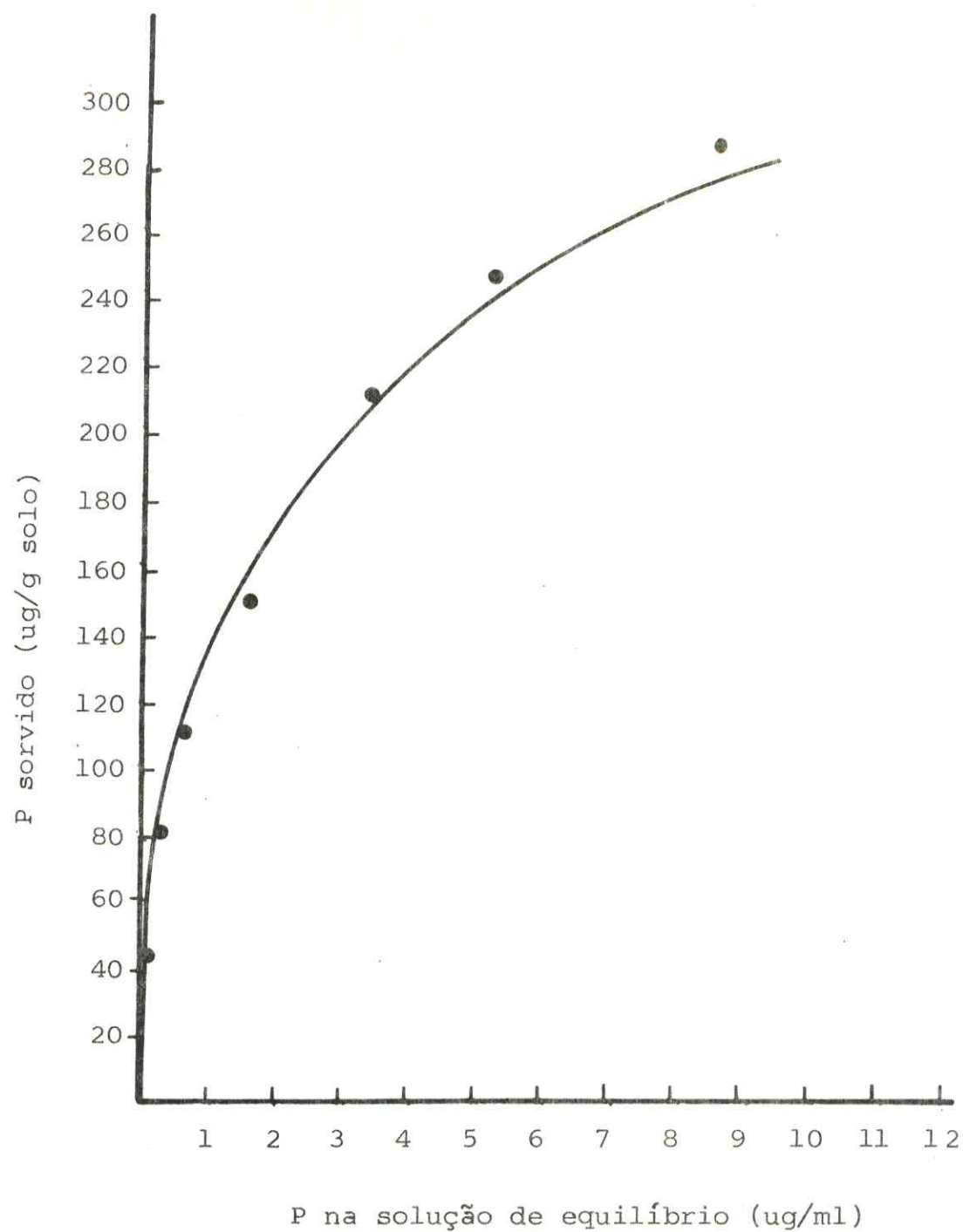


Fig. 10. Isotherma de sorção de fósforo do solo Ce3 (Quixeré-CE)

TABELA 02 - Concentração de fósforo na solução de equilíbrio após 24 horas.

SOLO	Concentração Inicial (ug P/ml)							
	0	2,0	3,5	5,0	8,0	12,0	15,0	20,0
	----- (ug P/ml) -----							
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₁) (Viçosa - CE)	0	0,17	0,58	1,53	3,47	6,35	8,07	12,19
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₁) (Ubajara - CE)	0	0,07	0,29	0,82	2,35	4,26	5,40	10,43
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₂) (Ibiapina - CE)	0	0,08	0,25	0,66	1,60	3,82	6,12	9,38
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₃) (Crato - CE)	0	0,02	0,03	0,04	0,07	0,30	0,67	0,90
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₄) (Crato - CE)	0	0,04	0,07	0,10	0,24	0,48	0,61	3,36
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₂) (Palmácia - CE)	0	0,33	0,59	1,73	3,12	5,71	8,14	11,74
Cambissolo Eutrófico (Ce ₁) (Quixeré - CE)	0	0,09	0,12	0,58	0,98	2,87	5,03	8,05
Cambissolo Eutrófico (Ce ₂) (Quixeré - CE)	0	0,34	0,90	1,71	3,89	6,66	8,74	11,66
Cambissolo Eutrófico (Ce ₃) (Quixeré - CE)	0	0,07	0,25	0,57	1,66	3,35	5,20	8,55

TABELA 03 - Quantidade de fósforo sorvido pelos solos após o equilíbrio (24 horas).

SOLO	Concentração Inicial (ugP/ml)							
	0	2,0	3,5	5,0	8,0	12,0	15,0	20,0
	(ugP/g solo)							
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₁) (Viçosa - CE)	0	45,74	73,00	86,69	113,34	141,18	173,20	195,23
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₁) (Ubajara - CE)	0	48,07	80,10	104,42	141,11	193,48	239,89	239,21
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₂) (Ibiapina - CE)	0	47,87	81,21	108,48	159,86	204,42	222,06	265,57
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₃) (Crato - CE)	0	49,49	86,69	124,09	198,07	292,39	358,28	477,60
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₄) (Crato - CE)	0	48,85	85,57	122,47	193,92	287,94	334,66	415,88
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₂) (Palmácia - CE)	0	41,69	72,60	81,62	122,06	157,29	171,48	206,48
Cambissolo Eutrófico (Ce ₁) (Quixeré - CE)	0	47,67	84,46	110,40	175,57	228,24	249,12	298,81
Cambissolo Eutrófico (Ce ₂) (Quixeré - CE)	0	41,59	64,89	82,13	102,70	133,57	156,38	208,44
Cambissolo Eutrófico (Ce ₃) (Quixeré-CE)	0	48,17	81,21	110,21	158,44	216,18	244,96	286,44

elevado valor, e que pode ser explicado pelo elevado teor de P disponível e o baixo teor de argila existente quando comparado com os demais (TABELA 01); os podzólicos (PE₁, Viçosa-CE e PE₂, Palmácia-CE), apresentaram os mais elevados valores de P na solução de equilíbrio; o baixo valor de argila para o solo (PE₁, Viçosa-CE) e a ausência de alumínio no solo (PE₂, Palmácia-CE) (TABELA 01) podem ser as causas principais desses elevados valores de P na solução de equilíbrio. O latossolo (LV₁, Ubajara-CE) também apresentou um P na solução de equilíbrio bastante elevado.

4.2 - Sorção máxima

A sorção máxima e a concentração de fósforo na solução de equilíbrio são importantes parâmetros quando estudamos os níveis de P no solo necessários para o ótimo crescimento das plantas; foi observado uma larga variação nos valores de sorção máxima, o que já era esperado devido a diferenças nas propriedades dos solos (TABELA 04).

A sequência das capacidades de sorção máxima de fósforo obtida (LV₃, Crato-CE > LV₄, Crato-CE > Ce₁, Quixeré-CE > Ce₃, Quixeré-CE > LV₂, Ibiapina-CE > LV₁, Ubajara-CE > PE₂, Palmácia-CE > Ce₂, Quixeré-CE > PE₁, Viçosa-CE) está de acordo com o esperado, principalmente nos solos que possuem elevados teores de alumínio e argila;

ocorreu uma maior sorção máxima nos latossolos do que nos podzólicos e isto está de acordo com os resultados encontrados no Brasil, comprovados nos estudos de CAVALCANTE & MELLO (1977); SÁ JÚNIOR et al. (1968); VELLOSO et al. (1982); SING et al. (1983); os podzólicos e cambissolos apresentaram valores mais baixos de sorção máxima que podem ser derivados dos valores dos pH mais elevados e dos baixos teores de alumínio.

Se levarmos em consideração o valor da sorção máxima dos solos estudados para efeito de recomendação de fósforo a ser aplicado, a fim de se obter um ótimo crescimento de plantas, os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) seriam os que exigiriam maiores quantidades de fertilizante fosfatado; essa diferenciação permite inferir que esses solos possuem uma alta capacidade de imobilização do fertilizante aplicado, a qual é determinada pela alteração na intensidade de fósforo na solução do solo; RAJAN (1973), verificou que a concentração de equilíbrio de P correspondente ao crescimento máximo de Painço, anteriormente fixada em 0,2ppm de P por BECKWITH (1965), não era constante e variava inversamente com o valor da sorção máxima de P dos solos.

A baixa sorção de P, apresentada pelos podzólicos, está associada aos baixos valores ou níveis das características destes solos (alumínio trocável, argila, óxidos de Fe e Al, etc) que afetam o fenômeno da sorção e que se correlacionam altamente com os valores de sorção máxima; com os latossolos, por conseguinte, podemos verificar que os

altos valores de P sorvido estão associados aos elevados níveis daquelas características as quais se correlacionam positivamente com a sorção máxima (TABELA 00); as equações de regressão linear obtidas a partir da equação de Langmuir por transformação linear podem ser vistas na TABELA 05.

4.3 - Capacidade tampão dos solos

Os índices de tamponamento que medem a capacidade tampão dos solos estudados podem ser vistos na TABELA 04. Capacidade tampão pode ser definida como a habilidade do fósforo da solução do solo em resistir a mudanças quando o P é adicionado ou removido do solo. A capacidade tampão é considerada como a mais importante propriedade dos solos afetando o comportamento do P lábil do solo.

Quanto à capacidade tampão, analisando os dados da TABELA 04, observa-se que houve um comportamento diferenciado dos nove solos estudados. Os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE), foram os que apresentaram maiores valores de capacidade tampão; isto pode ser atribuído aos elevados teores de argila e alumínio trocável existentes nestes solos, bem como ao baixo nível de P extraível e ao pH ácido (TABELA 01). Tudo isto reflete a alta superfície específica disponível para a sorção; esses altos valores de capacidade

tampão refletem ainda a dificuldade de remoção do fósforo da fase sólida; a este respeito FRIED & SHAPIRO (1956), concluíram que a capacidade de um solo para um contínuo suprimento de fósforo para a solução do solo é um importante fator na avaliação do status do fósforo de um solo.

A importância da capacidade tampão está relacionada com a disponibilidade de fósforo para as plantas. HOLFORD & MATTINGLY (1976b), têm mostrado que a medida da quantidade de fósforo lábil, junto com a capacidade tampão, podem explicar uma grande proporção da variação em absorção de fósforo pelas plantas para um determinado grupo de solos. Quando comparamos os solos entre si, tomando por base os valores de P na solução de equilíbrio (intensidade de P), TABELA 02, podemos afirmar que nos solos que possuem intensidade de P similares, (PE₁, Viçosa-CE, LV₁, Ubajara-CE, PE₂, Palmácia-CE e Ce₂, Quixeré-CE), a absorção pela planta será diretamente proporcional à capacidade tampão. Enquanto que, se tomamos por base os valores de fósforo sorvido (quantidade de P), TABELA 03, poderíamos dizer que os solos que contêm quantidades de P sorvido similares (LV₂, Crato-CE, LV₄, Crato-CE, Ce₁, Quixeré-CE e Ce₃, Quixeré-CE), a absorção pela planta será inversamente proporcional à capacidade tampão desses solos; isso reflete os valores das características que se correlacionam com a capacidade tampão dos solos.

Uma simples análise de laboratório não é considerada o bastante para que se possa predizer com segurança a quantidade desse elemento que o solo pode suprir (MATTINGLY,

TABELA 04. Valores de sorção máxima (X_m), energia de retenção (K) e índices de tamponamento (KX_m) dos solos equilibrados com soluções de concentrações entre 0-20 ppm de P, após 24 horas de equilíbrio em CaCl_2 0,01M.

SOLO	X_m	K	KX_m
	($\mu\text{gP/g solo}$)	($\text{ml}/\mu\text{gP}$)	(ml/g)
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₁) (Viçosa - CE)	208,29	0,57	119,77
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₁) (Ubajara - CE)	259,81	1,00	259,81
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₂) (Ibiapina - CE)	274,22	1,13	308,91
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₃) (Crato - CE)	504,34	5,88	2967,39
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV ₄) (Crato - CE)	445,83	3,06	1364,23
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE ₂) (Palmácia - CE)	230,47	0,45	104,36
Cambissolo Eutrófico (Ce ₁) (Quixeré - CE)	310,56	1,33	412,31
Cambissolo Eutrófico (Ce ₂) (Quixeré - CE)	212,95	0,46	98,91
Cambissolo Eutrófico (Ce ₃) (Quixeré - CE)	303,77	1,04	316,56

1965); para que tenhamos uma boa avaliação do fósforo disponível no solo, pelo menos três fatores devem ser considerados: fator intensidade (I), fator quantidade (Q), e fator capacidade ($\Delta Q/\Delta I$), destes, pelo menos dois (intensidade e capacidade) devem ser conhecidos para que se possa prever a absorção de fósforo, e, avaliar de modo mais adequado a real capacidade de fornecimento desse nutriente pelo solo. BARROW (1967), utilizando os valores de intensidade e capacidade de fósforo de 42 solos australianos, foi capaz de explicar a absorção de fósforo com precisão de 90%, quando cultivava estes solos.

NOVAIS & KAMPRATH (1978), e FREIRE et al. (1979), encontraram resultados que sugerem que a declividade das retas, obtidas pela relação do P recuperado e o P aplicado, é função dos parâmetros que refletem o fator capacidade ($\Delta Q/\Delta I$), ou seja, dos parâmetros que retratam a habilidade do fósforo da solução do solo em resistir às mudanças quando o fósforo é adicionado ou removido do solo, também chamado de tamponamento ou capacidade tampão.

TABELA 05 - Equações de regressão linear obtidas das relações entre o fósforo sorvido (C/X, ug //g de solo) e o fósforo da solução de equilíbrio (C, ug/ml) para os solos equilibrados em soluções de concentração variando de 0 - 20 ppm de P, após 24 horas de agitação em CaCl_2 0,01N.

Solo	Equações de regressão linear	r
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE1) (Viçosa-CE)	$C/X = 0,0083 + 0,0048C$	0,98**
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV1) (Ubajara-CE)	$C/X = 0,0038 + 0,0038C$	0,98**
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV2) (Ibiapina-CE)	$C/X = 0,0032 + 0,0036C$	0,99**
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV3) (Crato-CE)	$C/X = 0,0003 + 0,0019C$	0,97**
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV4) (Crato-CE)	$C/X = 0,0007 + 0,0022C$	0,99**
Podzólico Vermelho-Amarelo (PE2) (Palmácia-CE)	$C/X = 0,0096 + 0,0043C$	0,98**
Cambissolo Eutrófico (Ce1) (Quixerê-CE)	$C/X = 0,0024 + 0,0032C$	0,99**
Cambissolo Eutrófico (Ce2) (Quixerê-CE)	$C/X = 0,0101 + 0,0047C$	0,93**
Cambissolo Eutrófico (Ce3)	$C/X = 0,0031 + 0,0033C$	0,99**

**Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

4.4 - Relações entre sorção máxima, capacidade tampão e as propriedades dos solos.

A análise estatística revelou altas correlações entre os valores de sorção máxima e capacidade tampão com as propriedades dos solos.

Observando-se os solos em conjunto, vemos que a argila, o alumínio trocável e a CTC foram as propriedades dos solos mais significativamente relacionadas com a sorção máxima de fósforo (TABELA 06). Nos latossolos verificaram-se altas correlações entre a sorção máxima de fósforo, e o teor de argila, alumínio trocável, CTC, cálcio e magnésio (TABELA 06); estas altas correlações são justificadas principalmente pelos elevados teores de alumínio e argila presentes nestes solos.

Nos cambissolos estudados, as únicas propriedades dos solos que se correlacionaram com a sorção máxima foram a argila e a CTC, nestes solos o alumínio trocável é zero (TABELA 06).

Como na sorção máxima, também a capacidade tampão, na análise dos solos em conjunto, mostrou uma significativa correlação com a argila, alumínio trocável e com a CTC (TABELA 06). Nos solos latossólicos, quando relacionamos a capacidade tampão com essas propriedades, observamos também uma alta correlação, demonstrando que esses parâmetros são responsáveis pela elevada capacidade de tamponamento destes

solos, principalmente os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) (TABELA 06).

Nos cambissolos verificamos uma correlação apenas com a argila, matéria orgânica e CTC, o alumínio nestes solos é zero.

TABELA 06 - Coeficientes de correlação linear obtidos a partir da relação entre sorção máxima (X_m), capacidade tampão máxima (CTM) e algumas propriedades dos solos estudados.

Propriedades	Todos os solos		Latosolos		Cambissolos	
	X_m	CTM	X_m	CTM	X_m	CTM
Argila (%)	0,86**	0,69*	0,94**	0,80ns	0,89ns	0,76ns
Al trocável (Meq/100g)	0,75*	0,75*	0,96*	0,83ns	---	---
CTC (Meq/100g)	0,54ns	0,48ns	0,97*	0,85ns	-0,72ns	-0,87ns
Matéria orgânica (%)	-0,19ns	-0,12ns	-0,51ns	-0,68ns	-0,99ns	-0,99ns
pH	-0,27ns	-0,38ns	-0,21ns	-0,46ns	-0,84ns	-0,94ns
Cálcio (Meq/100g)	-0,21ns	-0,24ns	0,98*	0,85ns	-0,76ns	-0,89ns
Magnésio (Meq/100g)	-0,45ns	-0,51ns	-0,98*	-0,86ns	0,96ns	0,99ns
Potássio (Meq/100g)	-0,23ns	-0,33ns	-0,60ns	-0,56ns	-0,11ns	-0,34ns
Sódio (Meq/100g)	0,13ns	0,13ns	-0,34ns	-0,46ns	0,06ns	0,30ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%.

ns - Não significativo.

5. CONCLUSÕES

1. À medida que aumenta a concentração de P na solução de equilíbrio, aumenta a quantidade de fósforo sorvido. Os aumentos verificados não conservam a mesma proporção, ocasionando desvios nas isotermas de sorção, sugerindo que diferentes reações estejam ocorrendo.
2. É grande a diferença no fósforo sorvido pelos solos, como consequência das diferenças nas características dos solos, sendo a argila, o alumínio trocável e a CTC aquelas que melhor se correlacionam com a sorção de P.
3. Os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE), foram os que apresentaram maiores valores quanto ao P sorvido, seguidos dos cambissolos (Ce₁, Quixeré-CE e Ce₃, Quixeré-CE); podendo ser atribuído isto aos elevados teores de alumínio dos latossolos e ausência de P nativo dos cambissolos.
4. A baixa sorção de P apresentada pelos solos podzólicos (Pe₁, Viçosa-CE e Pe₂, Palmácia-CE) pode ser atribuída aos baixos valores das características (argila e alumínio trocável) que afetam o fenômeno da sorção.

5. Os latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) foram os que apresentaram os mais elevados valores de capacidade tampão de fósforo, seguidos pelos cambissolos (Ce₁, Quixeré-CE e Ce₃, Quixeré-CE).

6. A CTC dos latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE) apresentou uma alta correlação com os teores de argila, Al trocável e CTC, demonstrando que esses parâmetros são responsáveis pela elevada capacidade tampão desses solos, principalmente nos latossolos (LV₃, Crato-CE e LV₄, Crato-CE).

6. LITERATURA CITADA

ADAMS, E. & PEARSON, R. W. Crop response to lime in the southern United States and Puerto Rico. Am. Soc. Agronomy, p. 161-206, 1967.

ALMEIDA NETO, J. X. & BRASIL SOBRINHO, M. O. C. Fixação de fósforo em três solos sob cerrado de Goiás. R. bras. Ci. Solo 1:12-15, 1977.

APPELT, H.; COLEMAN, N.T. & PRATT, P.F. Interactions between organic compounds minerals, and ions in volcanic-ash-derived soils: II. Effects of organic compounds on the adsorption of phosphate. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 628-630, 1975.

BACHE, B.W. & WILLIAMS, E.G. A phosphate sorption index for soils. J. Soil Sci. 22:289-301. 1971.

BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais. III. índices de disponibilidade de fósforo e crescimento vegetal. Experientiae, 20:217-234, 1975.

BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M. ; RIBEIRO, A.C. & NOVAIS, R.F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. R. bras. Ci. Solo 7:243-249, 1983.

BARNES, J.S. & KAMPRATH, E.J. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. Agr. Exp. Stn. Tech. Bull. 229. 1975.

BARROW, N.J. Relationship between uptake of phosphorus by plants and the phosphorus potential and buffering capacity of the soil - An attempt to test Schofield's hypothesis. Soil Sci., 104: 99-106, 1967.

----- Modelling the effects of pH an phosphate sorption by soils. J. Soil. Sci. 35: 283-297, 1984.

----- & SHAW T.C. Sodium bicarbonate as an extractant soil properties. III Effects of the buffering capacity of a soil phosphate. Geoderma 16:273-283, 1967.

BECKETT, P.H.T. & WHITE, R.E. Studies on the phosphate potentials of soils. III. The pool of labile inorganic phosphate. Plant Soil. 21:253-282, 1964.

BECKWITH, R.S. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. Aust. J. Exp. Agric. An. Husb., 5:52-58, 1965.

BERTON, R. & PRATT, P.F. Uso de curvas de sorção para recomendação de fósforo em solos adubados com resíduos orgânicos. XXI Congresso Brasileiro de Ciências do Solo. 19 a 25 de julho de 1987.

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, 19: 124-136, 1972.

BRAY, R.H. Correlation of soils teste with crop response to added fertilizers and with fertilizer requeriments. Diagnostic techniques for soils and crops. American Potash Institute, p. 53-85, 1947.

CATANI, R.A. Contribuição ao estudo dos fosfatos, sua dosagem, extração e distribuição no solo do Estado do São Paulo. Tese de Doutorado, 65p. 1947.

----- . A fixação do fósforo por alguns solos do Brasil e a adubação fosfatada. VI Congresso Mundial de Adubos. Revista Agronômica, 52: 83-87, 1969.

CAVALCANTE, F.J.A. & MELLO, F.A. Fatores que afetam a fixação do fósforo. I. Período de incubação. Anais Esc. Sup. Agric. "Luiz de Queiroz", 34: 445-455, 1977.

CHANG, & CHU, W.K. The fate of soluble phosphate applied to soils. J. Soil Science, 2: 286-293, 1961.

COLE, C.V.; OLSEN, S.R. & SCOTT, C.D. Solubility, equilibrium constant of dihydroxy aluminum dihydrogen phosphate relating to a mechanism of phosphate fixation in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 15: 84-89, 1950.

-----; ----- & -----. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 352-356, 1953.

DE CARVALHO, M.M.; ANDREW, C.S.; EDARDS, D.G. & ASHER, C.J. Comparative performance of six *Stylosanthes* species in three acid soils. Aust. J. Agric. Res. 31: 61-76, 1980.

EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Classificação de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. Ministério da Agricultura, 1979.

FASSBENDER, H.W. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evolución usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnica Latino Americana, 3: 203-216, 1966.

FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34: 902-907, 1970.

FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils: I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27:403-407, 1963.

FREEMAN, J.S. & ROWELL, D.L. The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite. J. Soil Sci. 32: 75-84. 1981.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANCA, G.E.; SANTOS, H.L. & SANTOS, P.R.R.S. Adubação fosfatada para a cultura da soja (*Glycine max.* (L) Merrell) baseada no fósforo "disponível em diferentes extratores químicos e no "fator capacidade". R. bras. Ci. Solo. 3: 105-111, 1979.

FRIED, M. & SHAPIRO, R.E. Phosphate supply pattern of various soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20: 471-475, 1956.

GOEDERT, W.J. & SOUZA, D.M.E. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SEMINÁRIO P, Ca, Mg, S e MICRONUTRIENTES: Situação atual e perspectivas na agricultura. 1984. Anais. São Paulo, MANAH, S.A., 1986. p. 21-53.

GRIFFIN, R.A. & JURINAK, J.J. The interaction of phosphate with calcite. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37: 847-850. 1973.

----- & -----, Kinetics of the phosphate interaction of phosphate with calcite. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38: 75-79, 1974.

GUNARY, D. & SUTTON, C.D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. J. Soil Sci. 18: 167-173, 1967.

HARTER, R. Phosphorus adsorption sites in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33: 630-632, 1969.

HASEMAN, J.F.; BROWN, E.H. & WHITT, C.D. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminum. Soil Sci. 70: 257-271, 1950.

HINGA, G. Phosphate sorption capacity in relation to properties of several types of Kenya. Soil E. Afr. Agric. Forest. J. 38: 400-404, 1973.

HINGSTON, F.J.; ATKINSON, R.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Specific adsorption of anions on goethite. Trans. 9th. int. Cong. Soil Sci. 1, 669-678, 1968.

-----; -----; ----- & -----, Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. J. Soil Sci. 25: 16-26, 1974.

HOLANDA, J.S. & MEDEIROS, A.A. Caracterização de Solos Norte-Rio-Grandense quanto à adsorção do fósforo. Pesq. agropec. bras., 19: 1279-1284, 1984.

HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. The high and low-energy phosphate absorbing surfaces in calcareous soils. J. Soil Sci. 26: 407-417, 1975.

----- & ----- . Phosphate sorption by Jurassic oolitic limestones. Geoderma 13: 257-264, 1975.

HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. Plant and Soil 45: 433-444, 1976.

HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. Plant and Soil. 44: 219-229, 1976a.

----- & ----- . Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. Plant and Soil, 44: 377-389, 1976b.

HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphate soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 555-559, 1980.

JOSAND, P.C. & WILD, A. Phosphate adsorption and immobilization characteristics. Pesq. agropec. bras., 7: 1013-1021, 1982.

KAFKAFI, U.; BAR-YOSEF, B.; ROSENBERG, R. & SPOSITO, G. Phosphorus adsorption by Kaolinite and Montmorillonite: II. Organic Anion Competition. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1585-1589, 1988.

-----; -----; ----- & -----.
Phosphorus adsorption by Kaolinite and Montmorillonite: I Effect of time, ionic strength, and pH. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1580-1585, 1988.

KAMPRATH, E.J. Residual effect of large application of phosphorus on high phosphorus fixing soils. Agron. J., 59: 25-27, 1967.

-----, Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales. Suelos ecuatoriales, 6: 1-18, 1974.

-----, Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils. In: Ferri, M.G. ed. IV Simposio sobre o cerrado: bases para utilização agropecuária, ed. Itatiaia Ltda., p. 333-347, 1977.

KUO, S.; JELLUM, E.J. & PAN, W.L. Influence of phosphate sorption parameters of soils on the desorption of phosphate by various extractants. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 974-979, 1988.

KURTZ, L.T.; DeTURK, E.E. & BRAY, R.H. Phosphate adsorption by Illinois soils. Soil Sci., 61: 111-124, 1946.

KURTZ, L.T. Inorganic phosphorus in acid and neutral soils. Agronomy 4: 59-88, 1953.

LEAL, J.R. & VELLOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em latossolo sob vegetação de cerrado. Pesq. agropec. bras., Sér. Agron. 8: 81-88, 1973.

----- & -----, Desorção de fosfatos adsorvido em latossolos sob vegetação de Cerrado. II. Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução em equilíbrio. Pesq. agropec. bras., Ser. Agron. 8: 89-92, 1973.

LEHR, J.J. & van WESEMAEL, J.C. The influence of neutral salts on the solubility of soil phosphate. J. Soil Sci. 3: 125-135, 1952.

LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W. & STEPHENSON, H.F.
Identification of reaction products from phosphate
fertilizers in soils. Soil Sci. Am. Proc. 26: 446-452,
1962.

LOPEZ-HERNANDEZ, D. & BURNHAM, C.P. The covariance of
phosphate sorption with other soil properties in some
British and tropical soils. J. Soil Sci. 25: 196-206,
1974.

LOPEZ-HERNANDEZ, D. ; SIEGERT, G. & RODRIGUEZ, J.V.
Competitive adsorption of phosphate and oxalate by
tropical soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1460-1462. 1986.

LOW, P.F. & BLACK, C.A. Phosphate induced decomposition of
Kaolinite. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 12: 180-184, 1948.

----- & -----. Reactions of phosphate with
Kaolinite. Soil Sci. 70: 273-290, 1950.

MATTINGLY, G.E.G. Labile phosphate in soils. Soil Sci. 119:
369-375, 1975.

----- . The influence of intensity and capacity
factors on the availability of soil phosphate. Soil
phosphorus. Fish Food. Tech. Bull., 13: 1-9, 1965.

MENDOZA, R.E. & BARROW, N.J. Ability of three extractants to reflect the factors that determine the availability of soil phosphate. Soil Sci. 144: 319-329, 1987.

MORENO, E.C.; LINDSAY, W.L. & OSBORN, G. Reactions of dicalcium phosphate dihydrate in soils. Soil Sci. 90: 58-68, 1960.

MULJADI, D.A.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part I. The Isotherm and the effect of pH on adsorption. J. Soil Sci., 17: 212-229, 1966a.

-----; ----- & -----, The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part II. The location of the adsorption sites. J. Soil Sci. 17: 230-237, 1966b.

-----; ----- & -----, The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part III. The effect of temperature on the adsorption. J. Soil Sci. 17: 238-247, 1966c.

MURPHY, J. & RILEY, J.R. A modified single solution method for the determination of phosphate natural waters. Anal. Chem. Acta, 27: 31-34, 1962.

MURRMANN, R.P. & PEECH, M. Relative significance of labile and crystalline phosphate in soils. Soil Sci. 104: 249-255, 1969.

MUZILLE, O.; OLIVEIRA, E.L. & TORNEIRO, M.T. Emprego de análise do solo e estimativa de doses econômicas para adubação fosfatada e potássica em cultura de milho no Estado do Paraná, Brasil. Pesq. agropec. bras. 17:203-209, 1982.

NAGARAJAH, S.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Competitive adsorption of phosphate with polygalacturonate and other organic anions on kaolinite and oxide surfaces. Nature 228: 83-84, 1970.

NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 42: 931-935, 1978.

----- & -----, Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. R. bras. Ci. Solo, 3: 37-41, 1979.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21: 144-149, 1957.

OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In Khasawneh, F.E. Sample, E.C.; Kamprath, E.J. (ed.) The role of phosphorus in agriculture, p. 361-410. Amer. Soc. Agron. 1980.

OZANNE, P.G. & SHAW, T.C. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. Aust. J. Agric. Res., 18: 601-612, 1967.

----- & ----- Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate. Soil Sci. 2: 273-280, 1968.

PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J. & SMART, R. St. C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 39: 837-841, 1975.

PHILEN, O.D. Jr. & LEHR, J.R. Reactions of ammonium polyphosphates with soil minerals. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 31: 196-199, 1967.

PISSARIDES, A.; STEWART, J.W.B. & RENNIE, D.A. Influence of cation saturation on phosphorus adsorption by selected clay minerals. Can. J. Soil Sci. 48: 151-157, 1968.

PRATT, P.F. Diagnostic criteria for plants and soils. Div. Agric. Sci., p. 3-12, 1966.

RAJAN, S.S.S. Phosphorus adsorption characteristics of Hawaiian soils and their relationship to equilibrium phosphorus concentration required for maximum growth of millet. Plant and Soil 39: 519,532, 1973.

RENNIE, D.A. & MCKERCHER, R.B. Adsorption of phosphorus by four saskatchewan soils. Can. J. Soil Sci. 39: 64,75, 1959.

RYDEN, J.C. & SYERS, J.K. Retionalization of ionic straught and cation effects an phosphate sorption by soils. J. Soil Sci. 26: 395-406, 1975.

SÁ JÚNIOR, J.P.M.; GOMES, I.F. & VASCONCELOS, A.L. Retenção de Fósforo em Solos da Zona da Mata de Pernambuco. Pesq. agropec. bras. 3: 183-188. 1968.

SAMPLE, E.S. & COPELAND, J.P. Factores affecting soil P parameters derived from Langmuir adsorption isotherms. Agron. Abs. Ann. pg. 88, 1972.

- SANCHEZ, P.A. & UEARA, G. Magnament consid. In KHASAWNHE, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. U.S.A. p. 471-509. 1980.
- SING, R.; MOLLER, M.R.F. & FERREIRA, W.A. Características da Sorção do Fósforo relacionadas com propriedades selecionadas de solos dos trópicos úmidos da Amazônia. R. bras. Ci. Solo. 7: 233-241, 1983.
- SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.H.D. & MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soil from Rio Grande do Sul, Brasil. Soil Sci., 4:267-275. 1971.
- THOMPSON, L.M. El suelo y su fertilidad. Editorial Reverté, Barcelona. 1962.
- UDO, E.J. & UZO, F.O. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 6:879-883, 1972.
- VASCONCELOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & PINTO, O.C.B. Fósforo em dois latossolos do Estado de Mato Grosso. I. Sorção de Fosfato. Experientiae, 18: 267-285, 1975.

VELLOSO, A.C.; SANTOS, D.P. & RAMOS, D.P. Capacidade de Troca de cátions e adsorção de fosfato. Pesq. agropec. bras., 17:27-32, 1982.

WEIR, C.C. & SOPER, R.J. Solubility studies of phosphorus in some calcareous manitoba soils. J. Soil Sci. 14:256-261, 1963.

WILD, A. The retention of phosphate by soils. A review. J. Soil Sci. 1:221-238, 1950.

WILLIAMS, E.G. The intensity and quantity aspects of soil phosphate status and laboratory extraction values. Ann. Edafologia y Agrobiologia. 26: 525-546, 1967.

WOODRUFF, J.R. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29: 148-150, 1965.

YUAN, T.L.; ROBERTSON, W.K. & NELLER, J.R. Forms of newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 447-450, 1960.

APÊNDICE

TABELA 07 - Equações de regressão linear obtidas da relação entre sorção máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos solos estudados (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	9	$y = 105,85 + 7,43x$	0,86**
Al trocável (mE/100g)	9	$y = 234,48 + 83,65x$	0,75*
CTC (mE/100g)	9	$y = 181,21 + 23,13x$	0,54ns
Matéria orgânica (%)	9	$y = 371,70 - 46,13x$	0,19ns
pH	9	$y = 429,80 - 22,70x$	0,27ns
Cálcio (mE/100g)	9	$y = 324,05 - 8,03x$	0,21ns
Magnésio (mE/100g)	9	$y = 357,57 - 246,20x$	0,45ns
Potássio (mE/100g)	9	$y = 332,74 - 115,29x$	0,23ns
Sódio (mE/100g)	9	$y = 240,56 + 731,50x$	0,13ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T

ns - Não significativo.

TABELA 08 - Equações de regressão linear obtidas da relação entre sorção máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos latossolos (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	4	$y = 46,90 + 9,97x$	0,94ns
Al trocável (mE/100g)	4	$y = 54,50 + 187,61x$	0,96*
CTC (mE/100g)	4	$y = -12,52 + 65,55x$	0,97*
Matéria orgânica (%)	4	$y = 931,54 - 373,66x$	0,51ns
pH	4	$y = 737,30 - 79,20x$	0,21ns
Cálcio (mE/100g)	4	$y = 99,54 + 374,50x$	0,98*
Magnésio (mE/100g)	4	$y = 475,08 - 1040,35x$	0,98*
Potássio (mE/100g)	4	$y = 444,49 - 345,62x$	0,60ns
Sódio (mE/100g)	4	$y = 792,53 - 4322,91x$	0,34ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

ns - Não significativo.

TABELA 09 - Equações de regressão linear obtidas da relação entre sorção máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos cambissolos (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	3	$y = 147,10 + 4,83x$	0,89ns
CTC (mE/100g)	3	$y = 414,56 - 21,05x$	0,72ns
Matéria orgânica (%)	3	$y = 368,45 - 198,50x$	0,99ns
pH	3	$y = 1559,01 - 181,59x$	0,84ns
Cálcio (mE/100g)	3	$y = 379,36 - 18,61x$	0,76ns
Magnésio (mE/100g)	3	$y = 149,71 + 343,75x$	0,96ns
Potássio (mE/100g)	3	$y = 287,06 - 29,74x$	0,11ns
Sódio (mE/100g)	3	$y = 262,18 + 169,75x$	0,06ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

ns - Não significativo.

TABELA 10 - Equações de regressão linear obtidas da relação entre capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos solos estudados (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	9	$y = -749,30 + 54,12x$	0,69*
Al trocável (mE/100g)	9	$y = 6,72 + 770,33x$	0,75*
CTC (mE/100g)	9	$y = -358,90 + 191,34x$	0,48ns
Matéria orgânica (%)	9	$y = 1034,96 - 260,58x$	0,12ns
pH	9	$y = 2254,10 - 292,11x$	0,38ns
Cálcio (mE/100g)	9	$y = 858,98 - 85,93x$	0,24ns
Magnésio (mE/100g)	9	$y = 1203,86 - 2569,75x$	0,51ns
Potássio (mE/100g)	9	$y = 1019,74 - 1521,43x$	0,33ns
Sódio (mE/100g)	9	$y = 66,41 + 6693,20x$	0,13ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

ns - Não significativo.

TABELA 11 - Equações de regressão linear obtidas da relação entre capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos latossolos (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	4	$y = -1622,51 + 87,61x$	0,80ns
Al trocável (mE/100g)	4	$y = -1609,81 + 1680,13x$	0,83ns
CTC (mE/100g)	4	$y = -2212,54 + 587,53x$	0,85ns
Matéria orgânica (%)	4	$y = 9009,49 - 5183,47x$	0,68ns
pH	4	$y = 9689,14 - 1830,42x$	0,46ns
Cálcio (mE/100g)	4	$y = -1220,45 + 3373,13x$	0,85ns
Magnésio (mE/100g)	4	$y = 2165,81 - 9407,31x$	0,86ns
Potássio (mE/100g)	4	$y = 1939,86 - 3363,68x$	0,56ns
Sódio (mE/100g)	4	$y = 7228,26 - 61571,09x$	0,46ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

ns - Não significativo.

TABELA 12 - Equação de regressão linear obtidas da relação entre capacidade tampão máxima (y) de fósforo e algumas propriedades dos cambissolo (x).

Propriedades	Nº de observações	Equação de regressão linear	r
Argila (%)	3	$y = -46,30 + 12,13x$	0,76ns
CTC (mE/100g)	3	$y = 765,60 - 74,27x$	0,87ns
Matéria orgânica (%)	3	$y = 559,78 + 198,49x$	0,99ns
pH	3	$y = 4533,72 - 602,51x$	0,94ns
Cálcio (mE/100g)	3	$y = 635,03 - 64,51x$	0,89ns
Magnésio (mE/100g)	3	$y = -109,40 + 1050,89x$	0,99ns
Potássio (mE/100g)	3	$y = 382,28 - 279,87x$	0,34ns
Sódio (mE/100g)	3	$y = 84,43 + 2393,75x$	0,30ns

* -Significativo ao nível de 5%, pelo teste T.

** -Significativo ao nível de 1%, pelo teste T.

ns-Não significativo.