

CARLOS ALBERTO VASCONCELLOS

**FÓSFORO EM DOIS LATOSSOLOS DO ESTADO DE
MATO GROSSO: ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E
CRESCIMENTO VEGETAL**

VIÇOSA — MINAS GERAIS

1974



FÓSFORO EM DOIS LATOSSOLOS DO ESTADO DE MATO GROSSO:
ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E CRESCIMENTO VEGETAL

por



CARLOS ALBERTO VASCONCELLOS

T
13/84
VAS

Tese Apresentada à Uni-
versidade Federal de Viçosa,
como Parte das Exigências do
Curso de Fitotecnia, para a
Obtenção do Grau de "Magister
Scientiae".

VIÇOSA - MINAS GERAIS

1974

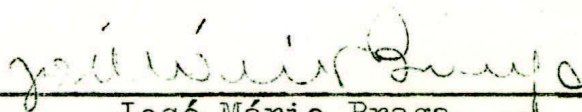


FÓSFORO EM DOIS LATOSSOLOS DO ESTADO DE MATO GROSSO:
ADSORÇÃO, DESSORÇÃO E CRESCIMENTO VEGETAL

por

CARLOS ALBERTO VASCONCELLOS

APROVADA:



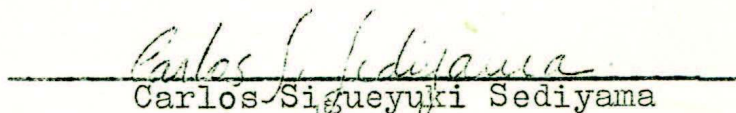
José Mário Braga
(Orientador)



Onofre Cristo Brumano Pinto



Telmo Carvalho Alves da Silva



Carlos Siqueyuki Sedyama



Rubens Vicente Rezende Pinheiro

À memória de MARIA LUIZA
FERNANDES e de ALICE DE SOUZA
VASCONCELLOS, aos meus pais,
irmãos e à VANEZA.

AGRADECIMENTOS

Ao se desenvolver um trabalho de Tese, inúmeras são as pessoas que merecem agradecimentos, tanto por colaborações diretas como indiretas. A todas, portanto, que auxiliaram para tornar essa Tese uma realidade, os meus agradecimentos sinceros. Todavia, de maneira especial agradeço:

Ao Conselho Nacional de Pesquisas, pela necessária Bolsa de Estudo concedida;

Ao DNPEA e ao IPEAO, através de seus respectivos diretores, Dr. Roberto Meirelles de Miranda e Dr. Renato Garcia Leoni, pelo apoio e incentivo;

Ao Conselho de Pós-Graduação da U.F.V., na pessoa do Dr. Pedro Henrique Monnerat, pela oportunidade oferecida;

Aos professores José Mário Braga e Roberto Ferreira de Novais, pela orientação e auxílio na execução da presente Tese;

Ao professor Mauro Rezende, pela ajuda na coleta de material;

Ao professor Onofre Cristo Brumano Pinto, pelas sugestões;

Ao IPEACO, através do Dr. Hélio Lopes dos Santos,

Chefe do Setor de Análise Foliar, pelas análises feitas;

À Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo -DNPEA - MA, pela ajuda e sugestões na escolha dos solos para a realização deste trabalho, através dos Drs. Marcelo Nunes Camargo e E. P. Mothci;

À Escola Federal de Minas de Ouro Preto, por permitir o uso de seu laboratório para identificação de argilas por difração de raios X;

Aos colegas e amigos, Rivaldo Chagas Mafra, Antonio Bahia Filho, Victor Hugo Alvarez, Washington Barreto de Oliveira, Maria Eugênia Maffia, Maria Bicalho e Ana Buccini, pela amizade e estímulo.

BIOGRAFIA DO AUTOR

CARLOS ALBERTO VASCONCELLOS, filho de José Joaquim de Souza Vasconcellos e Jandyra Fernandes Vasconcellos, nasceu no Rio de Janeiro, Estado da Guanabara, no dia 6 de agosto de 1943.

Em 1967, recebeu o diploma de Engenheiro Agrônomo pela Escola Nacional de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Em 1968, iniciou seus trabalhos profissionais no Instituto de Pesquisas Agropecuária do Oeste, Campo Grande - Mato Grosso.

Em 1971, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Fito-tecnia na Escola de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Formas de Fósforo no Solo.	3
2.2. Adsorção de Fosfatos	4
2.2.1. Generalidades	4
2.2.2. Isotermas no Estudo da Sorção	6
2.2.3. Natureza do Processo de Sorção.	9
2.2.4. Importância dos Compostos de Ferro e de Alumínio	10
2.2.5. Importância das Argilas Silicatadas na Sorção de Fosfatos	15
2.2.6. Alguns Aspectos para Estudo da Sor- ção de Fósforo pela Isoterma de Lang- muir.	17
2.3. Relação Entre Planta, Solo e Fósforo	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.	21
3.1. Solos Estudados.	21
3.2. Análises de Laboratório.	22
3.2.1. Curva de Neutralização.	22

3.2.2.	Determinação da Curva da Retenção de Umidade e Capacidade de Campo	24
3.2.3.	Determinação da Sorção Máxima em Função do pH.	24
3.2.4.	Determinação da Dessorção em Função do pH	25
3.2.5.	Determinação das Formas de Fósforo nos Solos	25
3.2.6.	Determinação do pH do Solo.	26
3.2.7.	Separação de Argila para Análise em Aparelhos de Raio X	26
3.2.8.	Análise da Parte Aérea e do Sistema Radicular	26
3.2.9.	Determinação do Alumínio Trocável	27
3.3.	Trabalhos em Casa de Vegetação	27
3.3.1.	Incubação	27
3.3.2.	Adubação e Plantio.	27
3.3.3.	Colheita e Análises Estatísticas.	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.	29
4.1.	Mineralogia da Fração Argila	29
4.2.	Sorção e Dessorção de Fósforo em Função do pH.	31
4.2.1.	Variação da Sorção de Fósforo com pH	31
4.2.2.	Dessorção em Função do pH	42
4.3.	Efeitos da Adubação Fosfatada em Níveis de Sorção Máxima	52
4.3.1.	Nas Formas de Fósforo no Solo	52
4.3.2.	Nas Produções da Parte Aérea e do Sistema Radicular e Absorção de Fósforo no LVE	56
4.3.3.	Nas Produções de Parte Aérea e do Sistema Radicular e Absorção de Fósforo no Latossolo Roxo.	70
5.	CONCLUSÕES.	83
6.	RESUMO.	87
7.	LITERATURA CITADA	89
8.	APÊNDICE.	97

LISTA DE QUADROS

QUADRO		Página
1	Características químicas do Latossolo Vermelho Escuro e do Latossolo Roxo na camada arável	23
2	Composição granulométrica dos solos LVE e LR EPFS/MA/DNPEA	24
3	Análise de Variância dos dados de P adsorvido em mg de P/g de solo para soluções com concentrações crescentes de P e pH variável.	32
4	Resultados para fósforo sorvido em mg de P/g do solo para soluções com concentrações crescentes de fósforo em quatro níveis de pH	34
5	Variação da capacidade máxima de sorção e da energia de sorção nos dois solos estudados em quatro diferentes pH	35
6	Análise de variância para os dados de três extrações sucessivas do fósforo sorvido, utilizando KCl 0,01 M, em quatro níveis de pH no LVE.	43
7	Análise de variância para os dados de três extrações sucessivas de fósforo adsorvido, utilizando KCl 0,01 M, em quatro níveis de pH, no LR.	44
8	Resultados obtidos para três dessorções sucessivas com KCl 0,01 M em quatro níveis de pH do Latossolo Roxo	46

QUADRO

Página

9	Resultados obtidos para o total de fósforo dessorvido e sua relação em função do total sorvido, em quatro níveis de pH no Latossolo Roxo, distrófico	47
10	Resultados obtidos para 3 dessorções sucessivas com KCl 0,01 M em quatro níveis de pH no Latossolo Vermelho Escuro, textura média.	48
11	Resultados obtidos para o total de fósforo dessorvido; sua relação em função do total sorvido em quatro níveis de pH no Latossolo Vermelho Escuro, textura média.	49
12	Formas de fósforo em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no LVE - média de quatro repetições	54
13	Formas de fósforo em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no solo LR. Média de 4 repetições.	55
14	Produção da parte aérea e do Sistema radicular do sorgo (<u>Sorghum vulgare</u> , Pers.) em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Vermelho Escuro	57
15	Análise de variância para os dados obtidos na produção da parte aérea e do sistema radicular em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no LR	64
16	Teores de fósforo total analisado na parte aérea e no sistema radicular do sorgo (<u>Sorghum vulgare</u> , Pers) cultivado no solo LVE em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada	69
17	Produção da parte aérea e do sistema radicular do sorgo (<u>Sorghum vulgare</u> , Pers) em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo.	71
18	Análise de variância para os dados obtidos na produção da parte aérea e sistema radicular em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo.	72
19	Teores de fósforo total analisados na parte aérea e no sistema radicular do sorgo (<u>Sorghum vulgare</u> , Pers) cultivados no solo LR em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada.	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Difractogramas de amostras de argilas do Latossolo Roxo distrófico e Latossolo Vermelho escuro, textura média, obtidos em Raio X	30
2	Isoterma de Langmuir para sorção de fosfatos em função do pH da suspensão no Latossolo Vermelho Escuro textura média	39
3	Isoterma de Langmuir para a sorção de fósforo em função do pH da suspensão no solo Latossolo Roxo, distrófico	40
4	Variação do pH inicial da solução de fósforo em equilíbrio com os solos LVE e LR, após reação com 18 horas de agitação. . . .	41
5	Produção de raízes em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada, LVE..	58
6	Produção da parte aérea em cinco níveis de adubação fosfatada e quatro de calagem no solo LVE	59
7	Teor de fósforo na parte aérea em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no solo Latossolo Vermelho Escuro. $C_1 = 0,00$; $C_2 = 386,0$; $C_3 = 637,0$ e $C_4 = 889,0$ mg de corretivos/100 gramas de solo. . . .	60
8	Produção de raízes e o teor de fósforo absorvido em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada. $C_1 = 0,00$; $C_2 =$	

FIGURA

Página

386,0; C₃ = 637,0 e C₄ = 889,0 mg de corretivos/1000 gramas de solo 61

9 Valores obtidos na relação entre o P da parte aérea e o P do sistema radicular no solo LVE. C₁ = 0,00; C₂ = 386,0; C₃ = 637,0 e C₄ = 889,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo 65

10 Produção da parte aérea e do teor de P absorvido no LVE. C₁ = 0,00; C₂ = 386,0; C₃ = 637,0 e C₄ = 889,0 mg de P/1000 gramas de solo 67

11 Produção de raízes e do fósforo absorvido em quatro níveis de calagem e cinco de fósforo - LVE - C₁ = 0,00; C₂ = 386,0; C₃ = 637,0 e C₄ = 889,0 mg de corretivo no solo 68

12 Produção de parte aérea em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo 73

13 Peso de raízes em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo roxo 74

14 Teor de fósforo encontrado na parte aérea em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo 75

15 Teor de fósforo encontrado no sistema radicular desenvolvido no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,00 e C₃ = 2.425,00 mg de corretivo/1000 gramas de solo. 76

16 Produção de raízes e seus teores de P em três níveis de calagem e cinco de fósforo no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo. 77

17 Produção da parte aérea e dos teores de fósforo analisados no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00, C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo 78

FIGURA

Página

18	Relação entre o teor de fósforo na parte aérea e no sistema radicular no Latossolo Roxo	79
----	---	----

1. INTRODUÇÃO

O fósforo, elemento essencial às plantas, é constituinte de diversos compostos orgânicos vitais como ácidos nucleicos, fosfolipídeos, fosfatos de adenosídeos, etc., tomando parte no metabolismo através de processos importantes para a vida do vegetal.

Para o desenvolvimento normal de uma planta, é necessário que este elemento esteja numa forma própria, em equilíbrio com outros nutrientes, em quantidade adequadas e em condições de ser absorvido pelo vegetal. Entretanto, em virtude de reações com compostos orgânicos e inorgânicos do solo, é comum a ocorrência de processos que promovem a transformação do fósforo em formas de menor solubilidade, resultando uma restrição na sua mobilidade e/ou na sua assimilação pelas plantas.

De acordo com HEMWALL (31), essa transformação era conhecida na Europa por volta de 1850, sendo encontradas citações de que o solo possuía a capacidade de reter fósforo. Nos Estados Unidos, citações similares apareceram após 1900.

De maneira geral, nos solos ácidos, a reação do fósforo com compostos de ferro e alumínio é responsável pela sua baixa solubilidade e reduzida disponibilidade

para as plantas. Tais compostos tanto podem ser precipitados da solução do solo como adsorvidos na superfície de óxidos e de alumínio, ou em partículas de argilas.

Por outro lado, solos com altos teores de óxidos de ferro e de alumínio estão frequentemente associados a áreas de temperaturas elevadas, altas precipitações e, geralmente, com pH abaixo de 5,5.

Nesses solos, o uso de calcário é prática necessária a fim de garantir uma razoável utilização do fertilizante fosfatado adicionado. Usualmente, um pH de solo, variando de 5,5 a 7,0, é sugerido como a melhor faixa para maior "disponibilidade" de fósforo.

Apesar do interesse que o assunto desperta, os problemas inerentes ao emprego do fertilizante fosfatado não têm sido estudados de modo sistemático, a despeito da maioria de nossos solos apresentarem alta capacidade de adsorção e baixos teores de P sob o aspecto agrícola. Desta forma, foi realizado o presente trabalho com o objetivo de estudar o efeito da adubação fosfatada (em níveis de saturação máxima calculada pela isoterma de Langmuir), e calagem em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso.

Procurou-se equacionar alguns problemas relativos ao emprego dessas práticas agrícolas tanto nas reações entre o solo e o fósforo como na produção do sorgo - produção de parte aérea e de sistema radicular - e na sua absorção total de fósforo. Quantificou-se e qualificou-se as diversas formas de fósforo no solo.

Em face das diversificações encontradas na metodologia de estudo da adsorção de fosfatos, procurou-se avaliar o efeito do pH na determinação da adsorção máxima calculada pela isoterma de Langmuir.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Formas de Fósforo no Solo

Os fosfatos nos solos são derivativos do ácido fosfórico (H_3PO_4) e podem ser divididos em duas grandes categorias: fosfatos inorgânicos e orgânicos (7).

A quantidade de fósforo nessas duas categorias varia bastante. O teor de fósforo orgânico tende a acompanhar o teor de matéria orgânica do solo. Geralmente, apresentam valores mais baixos para sub-solos e altos para a superfície (7).

Os principais compostos de fósforo orgânico são: fosfolipídeos, ácidos nucleicos, fosfatos inositol, fosfatos "metabólicos" e fosfo-proteínas (31).

Em geral esses compostos são provenientes de resíduos de plantas, animais e micro-organismos. São mineralizados lentamente a orto-fosfatos.

Os fosfatos inorgânicos, formados quase que exclusivamente por sais de ácido orto-fosfórico, podem ser classificados como fluor, oxi e hidroxí-fosfatos de ferro, alumínio, cálcio, titânio, magnésio e manganês (31). Nestas formas, um dos íons hidrogênio do H_3PO_4 são substituídos por cations metálicos, caracterizando a forma de fósforo

no solo (7).

2.2. Adsorção de Fosfatos

2.2.1. Generalidades

Inúmeros estudos têm demonstrado a existência de uma alta proporção de solos nas regiões tropicais e subtropicais, pertencentes aos Oxisols e Ultisols, com marcante capacidade para reter os fosfatos inorgânicos aplicados como fertilizantes (14, 19, 20, 40, 65, 69).

Provavelmente, em virtude dessa alta capacidade de retenção de fosfatos pelos solos, CATANI (14), em trabalhos comparativos entre as quantidades de fósforo adicionados num hectare e aquelas requeridas pelas culturas, concluiu pelo baixo aproveitamento da adubação fosfatada em solos do Estado de São Paulo e de outras regiões do país. Deve-se salientar que o fósforo ocorre nas plantas em quantidades menores do que os outros dois importantes macro-nutrientes, o nitrogênio e o potássio, aplicados em menores quantidades.

HEMWALL (31), também evidencia esse baixo aproveitamento da adubação fosfatada. Cita que somente de 10 a 30% da quantidade adicionada ao solo é absorvida pelas culturas. Os demais 90 a 70% são consumidos pelas atividades microbianas, precipitados por cations solúveis na solução do solo ou adsorvidos no seu complexo.

Altos valores para a capacidade de retenção foram encontrados por FASSBENDER (20) para oito latossolos da Bacia Amazônica. Nesses solos o autor verificou que a capacidade de retenção de P variava de 26,8 a 51,6%, ROEDER e BORNEMISZA (65), em solos aluviais e latossolos do Estado do Maranhão, encontraram valores extremos de 84,2 a 91,8% para a capacidade de retenção de fósforo.

Vários pesquisadores têm dedicado atenção a este

problema e, de maneira geral, a literatura mostra-se concordante quanto a retenção do fósforo pelos óxidos hidratados de ferro e de alumínio, principalmente (26, 33, 34, 69).

De acordo com BUCKMAN e BRADY (12), na maioria dos solos fortemente ácidos, a concentração de íons de ferro e de alumínio excede a de $H_2PO_4^-$ favorecendo a formação de fosfatos com menor disponibilidade, limitando a quantidade de $H_2PO_4^-$ imediatamente liberado para o vegetal.

Solos com altos teores de óxidos de ferro e de alumínio estão frequentemente associados a áreas com temperatura elevada e altas precipitações. Usualmente, o pH é abaixo de 5,5 (12,60).

Procurando definir a capacidade de retenção de fósforo pelo solo, WILD (73) reserva o termo sorção ou retenção para explicar a remoção de fosfatos da solução do solo pelos seus constituintes e, "fixação", apenas para descrever a transformação pela qual a disponibilidade do fósforo para as plantas é reduzida. HEMWALL (31) considera essa remoção de fosfatos da solução do solo está caracterizada pelos mecanismos de adsorção e absorção. A adsorção explica a concentração de material líquido ou gasoso na superfície de um sólido; a absorção, a incorporação desses materiais no sólido. Frequentemente, tem-se utilizado sorção como um termo coletivo para ambas as reações - adsorção e absorção (46).

LOW e BLACK (49) descrevem a adsorção como um fenômeno de baixas e médias concentrações. Em concentrações e levadas ocorrem reações de dissolução e precipitação com formação de uma nova fase cristalina (42). Entretanto, as concentrações baixas, médias e altas variam de solo para solo. Procurando contornar essa dificuldade, será utilizado apenas o termo "sorção" englobando todas as concentrações.

O processo reverso, ou seja, o movimento do fósfo-

ro da fase sólida para fase líquida, é caracterizado por Wiklander, citado por LARSEN (46), como dessorção.

2.2.2. Isotermas no Estudo da Sorção

Uma isoterma de sorção pode ser definida como a curva obtida através da relação entre a quantidade de uma substância sorvida numa interface e sua concentração de equilíbrio no meio de contacto com a interface. Em virtude de sua dependência com a temperatura, é necessário que seja obtida em temperatura constante (5, 72).

Para o caso do fósforo no solo, a determinação correta dessa isoterma, conforme definido acima, torna-se mais complexa. É praticamente impossível tanto definir como medir rigorosamente a quantidade de fósforo na fase sólida do solo em equilíbrio com soluções de concentrações conhecidas (5). De maneira ideal, a sorção de fosfatos deveria ser determinada num sistema no qual a superfície estivesse livre de fósforo.

LARSEN (46) divide o estudo da sorção de fosfatos nos solos em:

- a) estudos orientados para as investigações sobre a natureza e os mecanismos que envolvem a sorção de fosfatos e
- b) estudos orientados para o aspecto quantitativo.

O comportamento da sorção de fosfatos no sistema solo pode ser estudado quantitativamente pelo emprego de uma das isotermas de sorção existentes.

Alguns autores têm utilizado a isoterma de Freundlich cuja fórmula geral é:

$$Y = K c^{1/n} \quad \text{ou na sua forma linear:}$$

$$\log Y = \log K + 1/n \log c$$

onde \underline{K} e \underline{n} são constantes que variam de solo para solo;

Y a quantidade de P sorvido por unidade de peso do solo, e c, a concentração de P na solução de equilíbrio.

Essa equação, entretanto, não envolve nenhum modelo físico; suas constantes não possuem significado físico (5, 46) e, de acordo com HEMWALL (31), ela pode englobar reações de precipitação e não permite o cálculo da sorção máxima. Todavia, implica em se dizer que a energia de sorção decresce exponencialmente com o aumento da saturação de fósforo na superfície (5).

Uma outra equação bastante usada nos estudos de sorção de fósforo é a isoterma de Langmuir. Essa isoterma, em contraste com a anterior, possui constantes definidas quando analisada em relação à adsorção de gases sobre sólidos e possibilita a determinação da sorção máxima (5, 31, 46).

De acordo com MOORE (53), Langmuir, em 1916, baseou seu modelo de adsorção nas seguintes hipóteses:

- a) a superfície sólida contém um número determinado de pontos de adsorção. No equilíbrio, à temperatura e pressão gasosa quaisquer, uma fração θ de áreas é ocupada por moléculas adsorvidas e a fração $1-\theta$ não se acha ocupada;
- b) cada ponto pode manter uma molécula adsorvida;
- c) o valor de adsorção é igual para todos os pontos e não depende da fração θ recoberta;
- d) não há interação entre moléculas localizadas em pontos diferentes. A chance de uma molécula se condensar sobre um ponto não ocupado ou abandonar um outro ocupado, não depende dos pontos vizinhos estarem ou não ocupados.

OBS.: Neste enunciado utilizou-se o termo adsorção por se tratar de gases, conforme original.

LARSEN (46) coloca em dúvida a possibilidade de

tais postulados se enquadrarem na sorção de fósforo pelo solo. Como, por exemplo, a energia de sorção parece ser constante apenas numa estreita faixa de concentração. Por outro lado, parece improvável que a sorção seja restrita a mono-camadas, particularmente a altas concentrações onde algumas estruturas cristalinas poderão ser formadas.

OLSEN e WATANABE (57) encontraram boas correlações para a sorção de fósforo no solo através dessa isoterma, sem contudo oferecerem informação sobre os mecanismos que envolvem a sorção de fósforo. Os autores apresentaram a equação de Langmuir aplicada para líquidos ou ions cuja fórmula é:

$$x/m = Kbc/l + bc + \cancel{Kc}$$

ou na sua forma linear:

$$c/x/m = l/Kb + c/b \quad \text{onde,}$$

x/m - é a quantidade de fósforo sorvido, em mg por unidade de peso do solo;

c - concentração de fósforo na solução de equilíbrio;

K - constante de energia de retenção do fósforo;

l/b - inclinação da isoterma.

Deve-se observar que, em soluções de fósforo mais concentradas, com concentrações de equilíbrio maiores que $10^{-3}M$, a isoterma de Langmuir tende a ser curvelinea (57). Nesse ponto de vista, LARSEN (46) cita estudos da isoterma de sorção para 120 solos distintos. Na sua maioria, a relação entre $c/x/m$ e c foi curvelínea mesmo para soluções com concentrações de equilíbrio menores do que $6 \times 10^{-4}M$ de fósforo.

HSU (33), trabalhando com solos ligeiramente ácidos, informa que a sorção de fósforo é um produto de duas reações. A primeira delas completa-se com menor tempo de reação com a solução de fósforo (6 horas). Esse tipo de reação obedece à isoterma de Langmuir. A segunda reação,

mais lenta do que a anterior, corresponde à sorção em hidróxidos amorfos formados durante o experimento e não obedece aos princípios da isoterma.

Apesar dessas limitações, a isoterma de Langmuir pode ser usada para fornecer uma medida relativa da energia de retenção do fósforo e da sorção máxima (46).

Recentemente GUNARY (29) propôs a fórmula:

$$1/Y = B + A/c + D/\sqrt{c} \quad \text{onde,}$$

Y - é o fósforo adsorvido;

c - é a concentração de equilíbrio;

A, B, D - são constantes.

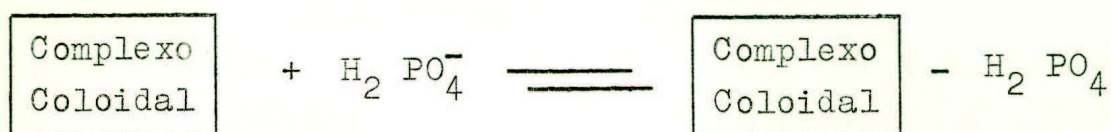
Comparada com as isotermas de Langmuir e Freundlich, essa equação forneceu melhores correlações. O autor, entretanto, não encontrou fundamentos teóricos para explicá-la. A inclusão do termo \sqrt{c} na equação de Langmuir poderia explicar o fato do solo sorver uma pequena quantidade de fosfatos, fracamente uma quantidade maior e, assim, de modo sucessivo, até um limite tal, quando todos os componentes do sistema estarão saturados (29).

2.2.3. Natureza do Processo de Sorção

Considera-se que, entre outros mecanismos, dois tipos de reações causam a retenção dos fosfatos. A primeira é a precipitação de fosfatos de baixa solubilidade do tipo das apatitas ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), strengita ($\text{Fe PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), variscita ($\text{Al PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e outros fosfatos complexos cristalizados ou em formas amorfas. Essas reações obedecem a princípios físico-químicos como a lei da ação das massas (18).

O segundo grupo de reações corresponde a uma sorção de ânions fosfatados a partículas coloidais do solo tais como matéria orgânica, argilas e hidróxidos, segundo

a fórmula:



Essas reações obedecem a leis específicas químico-coloidais (18).

A permuta de H_2PO_4^- com a hidroxila presente na borda da caolinita é o mecanismo mais simples para explicar a sorção de fosfatos. A reação pode ser representada do seguinte modo:



Essa reação indica, portanto, que o fosfato deve ser sorvido reversivelmente com respeito à concentração e ao pH.

2.2.4. Importância dos Compostos de Ferro e de Alumínio

Os hidróxidos de ferro e de alumínio têm sido reconhecidos por inúmeros pesquisadores como significativos na taxa de retenção de fosfatos pelo solo.

Em trabalho de revisão bibliográfica sobre o assunto, WILD (73) apresenta quatro pontos fundamentais que permitem facilitar a compreensão do fenômeno de sorção de fósforo através da formação de fosfatos de ferro e de alumínio, com menor "disponibilidade" para os vegetais, que são:

- 1- Correlação entre sorção de fosfatos e os teores de ferro e alumínio no solo;
- 2- Estudos da sorção de fosfatos com a remoção de

ferro e de alumínio;

- 3- Estudos da sorção de fosfatos com a adição de compostos de ferro e de alumínio;
- 4- Comparação entre o efeito do pH sobre a sorção de fosfatos de ferro e de alumínio.

1.º) Correlações Entre Sorção de Fosfatos e os Teores de Alumínio no Solo.

WILD (73) cita trabalhos de Gile que evidenciam o decréscimo da eficiência do superfosfato com o decréscimo da relação $\text{SiO}_2 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3)$.

Sá Jr. et alii (66), em solos da Zona da Mata de Pernambuco, informam sobre correlações positivas da sorção de fósforo com o teor de alumínio trocável. Quando o teor do alumínio aproximava-se de 1 eq.mg/100g, a interação do fósforo e do alumínio tornava-se importante para explicar a sorção superficial do fósforo.

Diversas outras correlações são encontradas na literatura FASSBENDER (19), por exemplo, em solos de áreas tropicais e sub-tropicais da América Central, menciona que os fosfatos de alumínio contribuíram com mais de 90% na sorção de fosfatos. O autor também obteve correlações positivas para Fe_2O_3 , alumínio trocável, argilas e matéria orgânica e correlações negativas para pH.

Em virtude das interações entre os componentes responsáveis pela sorção de fosfatos nos solos, esse ponto não fornece informações mais conclusivas, conforme poderá ser visto posteriormente.

2.º) Estudos da Sorção de Fosfatos com a Remoção de Ferro e de Alumínio.

Trabalhos de Toth, Kelley e Midgley, também citados por WILD (73), demonstraram a redução da sorção de fos

fatos quando óxidos de ferro e de alumínio eram eliminados dos colóides do solo.

Deve-se observar a necessidade de se conhecer, pelo menos aproximadamente, os teores das diversas formas de Fe e de Al no solo e suas respectivas contribuições na sorção de fosfatos. Diversas tentativas têm sido feitas não só nesse sentido como também no de procurar conhecer-se os vários parâmetros envolvidos na sorção de fosfatos.

É sabido, por exemplo, que os óxidos de ferro estão presentes no solo sob várias formas. Algumas, como hematita, são inertes nas reações químicas, outras, como precipitados recentes de hidróxidos de ferro possuem alta capacidade de sorção (33).

JACKSON (36) descreve que o ditionito não remove magnetita e ilmenita mas remove óxidos amorfos de ferro, hematita, goetita e limonita. Isso demonstra que nem todos os óxidos de ferro extraídos pelo ditionito são ativos na sorção de fósforo. Todavia, muitos autores têm citado correlações significativas entre as extrações de ferro com o ditionito e a sorção de fósforo.

AHENKORAH (2), por exemplo, investigando a capacidade de retenção de solos latossolos e suas relações com carbono orgânico, argila, ferro e alumínio, concluiu que o ferro extraído com ditionito e suas interações com o carbono orgânico e pH foram os principais fatores responsáveis pela retenção do fósforo. Não foi encontrada associação da retenção com argila e com o alumínio extraído com acetato de amônio pH 4.8.

HSU (33) admite que o aumento na reatividade de óxidos de ferro na sorção de fosfatos pode ser explicado por:

- a) Fe^{+3} liberado da decomposição de minerais silicatados e reprecipitados como hidróxidos de ferro em contacto com o ar;
- b) originalmente, os óxidos de ferro (tais como hemati-

ta), podem ser reduzidos, dissolvidos, reoxidados e reprecipitados como hidróxidos de ferro em contacto com o ar.

Admite-se que a reatividade dos óxidos de Fe está relacionada com sua taxa de diluição em ácido e uma extração, com 0,5 N de H_2SO_4 em uma hora de agitação, fornece uma medida arbitrária para os óxidos reativos do solo.

Em 12 solos ácidos, com vários teores de óxidos de ferro livre, RAMULU et alii (63) citam que o Fe nas interlâminas de vermiculita não é ativo na sorção de fósforo mas é extraído pelo ditionito. Os autores também encontram que o ferro extraído pelo oxalato fornece uma alta correlação com a capacidade de sorção dos solos estudados. Essa também é a opinião de SHUKLA et alii (67) para solos de sedimentos calcários e não calcários.

Objetivando um melhor entendimento das formas de ferro no solo, MCKEAGUE et alii (51) apresentam uma sequência de extrações que permite uma diferenciação aproximada entre o complexo orgânico, formas inorgânicas amorfas e as formas mais ou menos cristalinas. Os autores informam que extrações com pirofosfato 0,1 M fornecem os complexos orgânicos; a diferença entre o ferro extraído com oxalato e pirofosfato fornece o teor das formas inorgânicas amorfas e, a diferença entre ditionito e oxalato fornece uma razoável estimativa para o teor dos óxidos de ferro mais ou menos cristalinos.

Quanto as formas de alumínio no solo, na maioria dos casos, parecem apresentar-se mais efetivas na sorção dos fosfatos do que as de ferro. FRANKLING e REISENAUER (26), por exemplo, informam que os óxidos de alumínio são ao redor de 160 vezes mais efetivos que os de ferro.

SYERS et alii (69), trabalhando com 15 solos de diferentes origens, encontraram correlação positiva entre o teor de alumínio trocável e a sorção de fosfato. Ao se remover o alumínio trocável, entretanto, somente uma peque-

na redução de fósforo sorvido era obtida. Com a remoção de componentes amorfos de Fe e Al, pelo tratamento com oxalato, a redução na quantidade de P sorvido variou de 19 a 100%. Nesse caso, o autor verificou a maior atividade dos compostos amorfos de alumínio na sorção de fosfatos.

Resultados semelhantes foram encontrados no Brasil por LEAL (47) em solos latossolos sob cerrado.

COLEMAN et alii (16) verificaram que a quantidade de fósforo sorvido para 60 amostras de sub-solos correlacionou-se positivamente com o teor de alumínio trocável extraído com KCl 1 N. A sua remoção reduziu a capacidade sortiva de solos que continham apreciáveis quantidades de Al trocável. Para solos com baixos teores de Al trocável e maiores quantidades de óxidos de ferro e de alumínio (ou hidróxidos), a sorção de fósforo não foi afetada pela remoção de Al trocável.

Como pode ser verificado, em virtude do alto grau de correlação entre os parâmetros envolvidos na sorção de fosfatos no solo, torna-se difícil identificá-los e quantificá-los (69).

3.º) Estudos de Sorção de Fosfatos com Adição de Compostos de Ferro e de Alumínio.

Trabalhos de Doughty, em solos orgânicos (com mais de 50% de matéria orgânica), citado por WILD (73), demonstraram aumento considerável de sorção quando saturava o solo com ferro e alumínio.

HSU (33), nessa mesma linha de pesquisa, observa que o fosfato foi sorvido principalmente por Al ou Fe. As formas de Ca foram praticamente as mesmas.

4.º) Comparação entre o Efeito do pH Sobre a Sorção de Fosfatos de Ferro e de Alumínio.

Trabalhos de Teskle, citados por WILD (73), eviden

ciam a precipitação máxima de fosfatos de ferro a pH 3,0 e o de alumínio a pH 6,8. KARIN e KHAN (41) apresentam relações entre o pH e a sorção de fosfatos pelos sesquióxidos de ferro e de alumínio. A sorção aumenta com o aumento do pH de 4,0 a 5,3 mas, quando o pH do solo alcança o valor de 5,3, tal forma ($P-R_2O_3$) começa a decrescer. Desse modo, pode-se esperar que, com o aumento do pH, tais formas diminuam sua atividade permitindo maior "disponibilidade" às culturas.

Deve-se, contudo, salientar a formação de compostos de fósforo e cálcio à medida que o pH aproxima-se de 6,0. Tais compostos apresentam-se cada vez mais insolúveis com a elevação do pH.

Os fatos, portanto, parecem indicar a existência de uma faixa ideal de pH na qual é máxima a "disponibilidade" de fosfatos para os vegetais.

Sobre tal aspecto, De DATTA et alii (17), analisando a quantidade de fósforo remanescente na solução do solo em presença de vários níveis de pH (com uma hora e quarenta e oito horas de reação), concluíram que após 48 horas, a quantidade de fósforo adicionado e remanescente na solução, aumentava com a elevação do pH acima de 5,4. A calagem em excesso deprimiu a solubilidade do fertilizante fosfatado.

2.2.5. Importância das Argilas Silicatadas na Sorção de Fosfatos.

A reação do fósforo com as argilas silicatadas do solo tem recebido considerável atenção dos pesquisadores. É provável que cations de alumínio, originados da dissociação da estrutura das argilas ou dos pontos de troca, sejam os responsáveis pela retenção de fosfatos nas argilas silicatadas (32).

Cada tipo de argila, correlacionada com suas condições no solo, deve possuir uma adequação própria na sor-

ção de fosfatos. HALL e BAKER (30) encontraram que a montmorilonita possui uma relação positiva entre a sorção e o pH, isto é, à medida que se aumenta o pH, maior é a sorção. Este aumento da sorção pela montmorilonita parece não estar associada com um decréscimo na absorção de P pelas plantas. A vermiculita sorveu menos fósforo com o aumento do pH.

A sorção de fósforo, estudada com variações de pH (entre 3,0 e 10,0) em argilas do tipo caolinita e em óxidos de alumínio (gibbsita e pseudoboehmita) por MULJADI et alii (54, 55 e 56), ocorreu principalmente a baixas e médias concentrações de fósforo. Em altas concentrações, KITTRICK e JACKSON (43) verificaram reações de dissolução e precipitação de fósforo com formação de fases cristalinas.

As isotermas de adsorção, quanto à concentração, foram divididas em três regiões correspondentes a três pontos energeticamente diferentes, similares àquelas propostas por BACHE (4) para gibbsita (54).

Região I - Correspondente a concentrações menores que 10^{-4} M de fosfato.

Essa região apresentou maior energia de retenção, com o fósforo associado às faces de cristais ou a pontos de troca da caolinita. O mecanismo básico envolve o grupo $\text{Al}(\text{OH})_2$ o qual é comum tanto para óxidos como para caolinita.

Região II - Correspondente a concentrações intermediárias de fósforo (entre 10^{-4} à 10^{-3} M PO_4^{\equiv}).

Considera-se que o fósforo também fica associado às faces de cristais ou a pontos de troca da caolinita. En

Entretanto, a energia de sorção é menor que a anterior (54, 55, 56).

Região III - Correspondendo a concentrações média e alta de fósforo (10^{-3} à 10^{-1} M PO_4^{\equiv})

Nessa região é provável haver penetração de fósforo em alguma região amorfa do cristal.

Para a caolinita, em todas as regiões, as isotermas apresentaram reversibilidade com relação ao pH. Nas regiões II e III, reversibilidade apenas com relação à concentração. Para gibsitita e pseudoboehmita essa reversibilidade foi bem menor.

Essas três regiões da isoterma de sorção também foram evidenciadas no Brasil em alguns solos sob vegetação de cerrado (47).

2.2.6. Alguns Aspectos para Estudo da Sorção de Fósforo pela Isoterma de Langmuir.

A metodologia inicial para estudos da sorção de fósforo foi proposta por OLSEN e WATANABE (57). Consiste em se tratar amostras de solo com concentrações crescentes de fósforo, durante um determinado tempo de reação (24 horas). Em seguida, mede-se o fósforo na solução e emprega-se a equação de Langmuir.

Vista sobre esse aspecto, parece simples a metodologia de sorção. Entretanto, ela é função de uma série de outros fatores aos quais, praticamente, não se tem dado as devidas atenções.

Quanto ao tempo de contacto, por exemplo, OLSEN e WATANABE (57) verificaram haver aumento da capacidade máxima de sorção de fósforo pelo solo com a elevação do tempo de contacto entre o solo e a solução. Posteriormente, FASSBENDER (18) confirmou que a capacidade máxima de sor-

ção é uma função exponencial do tempo de reação. Ocorre, inicialmente, em grande velocidade e diminui com o tempo.

A constante de energia de sorção varia de solo para solo e está correlacionada com o tempo de contacto da solução com o solo.

Nenhuma atenção tem sido dada também ao controle do pH da suspensão durante a reação de sorção, fator bastante significativo. No seu trabalho de Tese, LEAL (47), por exemplo, informou que a sorção máxima de fosfatos diminui com o aumento do pH em diversos solos latossolos sob cerrado.

2.3. Relação Entre Planta, Solo e Fósforo

Quando se adiciona fósforo na forma solúvel ao solo, esse elemento pode tomar diversas formas: fósforo solúvel em água, fósforo ligado a alumínio, ferro e cálcio, fósforo solúvel em redutor e fósforo ligado a formas orgânicas. Essas formas existem na dependência do pH, do produto de solubilidade dos diversos fosfatos, dos cations presentes no solo e do seu grau de intemperização (33).

Desde que exista equilíbrio entre a fase sólida do solo e a fase líquida, torna-se de capital importância o conhecimento das formas de P predominantes após uma adubação fosfatada e as influências no desenvolvimento vegetal. Tal importância se acentua sob o aspecto da pouca mobilidade do fosfato no solo, conforme tem sido demonstrado por vários pesquisadores. Dyer, citado por WILD (73), após contínuos cultivos com trigo, encontrou que a maior parte do fosfato não consumido pela cultura estava presente até uma profundidade de 22,5 cm. FOX e KAMPRATH (23) encontraram redução na capacidade máxima de sorção de P em solos que receberam, 10 anos antes, elevados níveis de adubação fosfatada.

Quanto ao sistema radicular e absorção, aceita-se que as raízes obtêm o fósforo necessário para o desenvol-

vimento da planta na solução do solo. Existem, porém, hipóteses que indicam a possibilidade da absorção desse elemento pelo contacto das raízes com a fase sólida do solo. Esta absorção por contacto não parece ser expressiva. Enquanto que a solução do solo fica em equilíbrio com grande porção da fase sólida, apenas uma pequena fração dessa fase fica em contacto com o sistema radicular.

O movimento do fósforo para a região de absorção radicular é um fator que merece atenção especial. De acordo com BARBER (11), esse movimento é feito principalmente por difusão. Conclusão similar foi obtida por OLSEN et alii (58). Como sugerido por MAHTAB et alii (50), a difusão do fósforo é marcadamente influenciada pelo teor de umidade do solo, daí a necessidade de se utilizar maior adubação fosfatada em culturas desenvolvidas durante um período de umidade restrita.

Por outro lado, tem sido observado repetidamente que as respostas das plantas ao fósforo é uma função da solubilidade do fósforo existente no solo e de fatores que alteram essa solubilidade (31).

Drake e Steel, citados por HEMWALL (31), propuseram alguns mecanismos pelos quais as próprias plantas podem influenciar na solubilidade do fósforo, favorecendo a absorção:

- a) redução da atividade iônica de cálcio na solução do solo através dos pontos de troca da raiz;
- b) redução da atividade de ferro e alumínio na solução do solo através de formação de complexos orgânicos, com produtos secretados pelas raízes.

Quanto ao efeito da calagem na sorção de fosfatos, aumentando a disponibilidade de fósforo, pode-se analisá-lo sob o aspecto da neutralização do alumínio trocável, efeito do pH sobre a atividade de óxidos hidratados de Fe e Al, saturação em Ca e sobre equilíbrio nutricional com

outros elementos.

Em solos com apreciáveis quantidades de alumínio trocável, WOODRUFF e KAMPRATH (74) encontraram que a sorção máxima de fósforo decresceu com a calagem. PEARSON (59), cita que a calagem afetou as formas de P - Al, (formas de fósforo ligadas ao alumínio), e de fósforo solúvel em ácido diluído, em solos com 12 anos de cultivos. Os solos que não receberam calagem possuíam maior teor de P-Al e, os com calagem possuíam maior teor de fósforo solúvel em ácido diluído. Nesse caso, a calagem parece ter aumentado o fósforo "disponível".

BRAGA e DEFELIPO (10) encontraram aumento nas formas de P-Al, P-Fe, P-Ca e P-solúvel em redutor, com a calagem em nove Latossolos.

Em solos ácidos e com altos teores de sesquióxidos, ROBERTSON et alii (64) verificaram que a "disponibilidade" do fertilizante fosfatado aumentou. Entretanto, com pH acima de 6,3 houve decréscimo da "disponibilidade" de fósforo.

Quanto a necessidade de maiores estudos sobre o equilíbrio entre nutrientes, ADRIANO et alii (1) apresentam interessantes evidências para a cultura do milho. Os autores citam que o N e o K favorecem a absorção de P; o Ca antagoniza o fósforo, zinco e ferro. Citam, também, o sinergismo entre o magnésio, fósforo e zinco. Em altas concentrações de fósforo, as interações com ferro e zinco apresentam antagonismo mútuo, impedindo mais a translocação do que a absorção.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Solos Estudados

Procurou-se estudar dois solos de maior predominância na região sul do Estado de Mato Grosso, com teores distintos de argila, óxidos de ferro e alumínio e valores semelhantes para alumínio trocável e pH. Desta forma, foram escolhidos:

- a) Latossolo Vermelho Escuro, distrófico. A fraco, textura média, fase cerrado sub-caducifólio, relevo plano e suave ondulado (Perfil n.º 19 - EPFS/MA/DNPEA). Seguindo-se o Suplemento da 7.ª Aproximação de 1967, enquadra-se como Haplustox (+).
- b) Latossolo Roxo, distrófico. A fraco, textura argilosa, fase campestre, relevo plano (Perfil n.º 24 - EPFS/MA/DNPEA). Na 7.ª Aproximação, enquadra-se como Haplortox (45). Deve-se salientar que este perfil aproxima-se bastante dos Umbriorthox apesar do epipedon não ser úmbrico por não satisfazer o requisito de croma menor que 3,5 quando úmido. A percentagem de carbono aproxima-se

(+) CAMARGO, M.N. Informação particular. 29/3/1972. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Rio de Janeiro, GB.

bem do requisito para Umbriorthox (menor que 1%), sem contudo satisfazer esta exigência, até a profundidade de 75 cm (Fig. 1A).

As características químicas e granulométricas dos solos estudados estão apresentadas nos Quadros 1 e 2, respectivamente.

3.2. Análises de Laboratório

3.2.1. Curva de Neutralização

As amostras dos solos descritos foram destorroadas e passadas em tamiz com 2 mm de abertura.

As quantidades de hidróxidos de cálcio e de magnésio, na determinação da curva de neutralização dos solos, foram determinadas de tal forma a fornecer 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25 e 1,50 vezes o teor de $H^+ + Al^{+++}$ expresso em eq. mg./100 gramas de solo na proporção de 5:1 de Ca para Mg. Estas quantidades foram, então, transferidas para recipiente de plástico contendo 100 gramas de solo, com duas repetições.

A acidez trocável ($H^+ + Al^{+++}$) foi determinada pelo método apresentado por VETTORI (70).

Cada tratamento recebeu a quantidade de água necessária para atingir 80% da capacidade de campo, determinada conforme item 3.2.2. Os recipientes foram cobertos de tal maneira a evitar evaporação e entrada de materiais estranhos, mas permitindo o equilíbrio de CO_2 .

Semanalmente, mediu-se o pH na relação 1:1 entre solo e água (37), até completar 30 dias de incubação. A estabilidade de leitura, para ambos os solos, foi obtida aos 17 dias após iniciada a incubação. As leituras de pH foram efetuadas em BECKMAN pH METER modelo H_G .

Para a determinação das curvas tomou-se a média das três últimas leituras (17, 23, 29 dias de incubação). A

QUADRO 1 - Características químicas do Latossolo Vermelho Escuro e do Latossolo Roxo na camada arável⁺

Solo	Prof. em cm	Complexo Sortivo eq. mg/100 g								pH		C Orgânico %	Ataque por H ₂ SO ₄ d = 1,47				
		Ca	Mg	K	Na	S	Al ⁺⁺⁺	H ⁺	T	Água	KCl 1N		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
LVE	0- 10	0,2		0,06	0,06	0,3	1,2	3,2	4,7	4,8	4,2	0,66	4,4	3,9	2,6	0,40	0,03
LVE	10-35	0,1		0,17	0,12	0,4	1,0	2,2	3,6	4,9	4,3	0,46	4,7	4,7	2,8	0,49	0,03
LR	0- 10	1,8	1,2	0,29	0,03	3,3	1,7	5,5	10,5	5,1	4,1	1,61	21,6	19,0	29,0	6,65	0,08
LR	10-25	1,0		0,13	0,02	1,2	2,2	3,9	7,3	5,2	4,1	1,23	21,2	19,7	29,8	6,99	0,08

⁺ Análises feitas pela EPFS/MA/DNPEA.

representação gráfica, Figuras 2A e 3A, informam as quantidades de calcário necessárias para se alcançar os pH desejados.

QUADRO 2 - Composição granulométrica dos solos LVE e LR EPFS/MA/DNPEA(+)

SOLO	Profundidade (cm)	Composição Granulométrica %				Argila dispersa em água (%)	Grau flocculação (%)
		Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		
LVE	0-10	39	43	7	11	8	27
	10-25	38	43	6	13	10	23
LR	0-10	5	16	22	57	17	70
	10-25	5	15	21	59	11	81

(+) OBS.: Essas análises foram dispersas em NaOH e Calgon.

3.2.2. Determinação da Curva da Retenção de Umidade e Capacidade de Campo

A curva característica de retenção de umidade foi determinada usando-se a panela de pressão para tensões de 1/10 e 1/3 de bária. Para tensões de 1, 3, 5, 10 e 15 bárias utilizou-se o aparelho de membranas conforme metodologia proposta por FERNANDES e SYKES (22). As curvas obtidas para os dois solos acham-se representadas nas Figuras 4A e 5A.

Determinou-se, também, a capacidade de campo através de tubos de plásticos de 60 cm de comprimento com 4 cm de diâmetro (22).

3.2.3. Determinação da Sorção Máxima em Função do pH

Foram adicionadas concentrações crescentes de P (0

a 90 ppm) em amostras de 2,5 gramas de solo, passadas em tamiz com abertura menor que 1 mm de malha, com pH variando de pH natural do solo, 4,9 para o LVE e 5,2 para o LR e pH 6,0; 6,5 e 7,0 - para ambos os solos em KOH e KCl 0,01 M.

Esta suspensão solo-solução foi agitada por um período de 18 horas (29) em agitador do tipo Wagner.

Após as 18 horas de agitação, as amostras foram centrifugadas a 2.500-3.000 rpm durante 15 minutos. O fósforo remanescente na solução límpida foi determinado colorimetricamente (9). O fósforo sorvido foi, então, determinado pela diferença entre as concentrações inicial e final. Com os dados, calculou-se estatisticamente as isotermas de Langmuir (68).

Objetivando-se determinar as variações de pH nas soluções de equilíbrio, em amostras recebendo os mesmos tratamentos anteriores, mediu-se o pH da suspensão após as 18 horas de agitação.

3.2.4. Determinação da Dessorção em Função do pH

Após o equilíbrio de 2,5 gramas de solo, com soluções de concentrações crescentes de fósforo, efetuou-se três extrações sucessivas com 25 ml de solução em KCl 0,01 M acompanhando as variações de pH natural (4,9 para o LVE, 5,2 para o LR), 6,0; 6,5 e 7,0 em KOH. Utilizou-se um período de agitação de 9 horas em agitador do tipo Wagner. Em cada extração, a solução sobrenadante foi retirada e analisada para fósforo, de acordo com BRAGA e DEFELIPO (9).

3.2.5. Determinação das Formas de Fósforo nos Solos

Após o plantio, amostras de cada tratamento foram analisadas para determinação das formas de fósforo solúveis em NH_4Cl , NH_4F , NaOH e H_2SO_4 , conforme metodologia a-

presentada por CHANG e JACKSON (15) e adaptada por BRAGA (8).

3.2.6. Determinação do pH do Solo

Amostras de solos foram retiradas de todos os tratamentos, antes do plantio e após colheita, nas quais mediu-se o pH em água na relação 1:1.

3.2.7. Separação de Argila para Análise em Aparelhos de Raio X

Procurando obter-se maior dispersão das argilas, em 20 gramas de solo adicionou-se acetato de sódio pH 5,0 para eliminação de carbonatos e H_2O_2 30% para eliminação de matéria orgânica, conforme metodologia proposta por KITTRICK e HOPE (44). A dispersão e a separação das argilas foram feitas conforme VETTORI (70).

Em outra amostra de 20 gramas, também tratadas com acetato de sódio pH 5,0 e H_2O_2 30%, eliminou-se o ferro com ditionito de sódio (45). A dispersão e a separação das argilas foram feitas conforme VETTORI (70).

Após a dispersão das argilas, 3 ml da suspensão foram colocados lentamente em lâminas de vidro e, após, submetidas a análises de difração dos raios X (Aparelho da Escola Federal de Minas de Ouro Preto, com radiações de Cu - Ni, marca Philips).

Em virtude dos difractogramas obtidos nas amostras com Fe não terem apresentado reflexão basal maior do que $7,16 \text{ \AA}^0$, (indicando a possível ausência dos minerais do tipo 2:1), não se efetuou tratamento com potássio e magnésio.

3.2.8. Análise da Parte Aérea e do Sistema Radicular

Após o plantio, os teores de fósforo na parte aérea

e no sistema radicular do sorgo foram determinados de acordo com a metodologia proposta por LOTT et alii (48), no laboratório de análise do IPEACO. Os resultados, expressos em porcentagem do peso seco.

3.2.9. Determinação do Alumínio Trocável

Logo após o plantio, o alumínio trocável foi determinado em todos os tratamentos conforme metodologia proposta por VETTORI (70).

3.3. Trabalhos em Casa de Vegetação

3.3.1. Incubação

Baseando-se na curva de neutralização dos solos, foram determinadas as quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{Mg}(\text{OH})_2$, na proporção de 5:1, necessárias para se elevar o pH a 5,5, 6,0 e 6,5 no Latossolo Vermelho Escuro e a 6,0 e 6,5 para o Latossolo Roxo.

Para cada pH foram pesados 24 quilos de TFSA (LVE e LR), misturadas às respectivas quantidades de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + $\text{Mg}(\text{OH})_2$, distribuídos em vasos de plástico com capacidade para 1 quilo de terra, irrigados à capacidade de campo, tarados (peso inicial) e devidamente fechados para evitar evaporação excessiva e entrada de materiais estranhos.

Periodicamente, a água evaporada era repostada até atingir o controle de peso inicial de cada recipiente.

A incubação teve um período de duração de 60 dias (14/4/72 à 16/6/72).

3.3.2. Adubação e Plantio

Dentro de cada nível de pH determinado anteriormente, efetuou-se adubações fosfatadas de tal forma a forne-

cer 0; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,0 vez a sorção máxima calculada com a solução de contacto ao pH natural de cada solo. O adubo, KH_2PO_4 , passado em tamiz com abertura de malha menor que 1 mm, foi adicionado a cada 4 quilos de solo previamente incubado, misturado cuidadosamente e distribuído em vasos plásticos com capacidade para 1 kg.

Quanto aos demais nutrientes (N, K e micro-nutrientes), foram constantes para todos os tratamentos e baseados na metodologia proposta por WAUGH e FITTS (71).

O sorgo (Sorghum vulgare, Pers) foi semeado utilizando-se 20 sementes (85% de poder germinativo) por vaso. Posteriormente, foi feita uma irrigação de tal forma a atingir 80% da capacidade de campo de cada solo.

Este conjunto de vaso-solo-planta foi, periodicamente, redistribuído, inteiramente ao acaso, na Casa de Vegetação.

Através do controle do peso inicial e final, a água evaporada era repostada. Quinze dias após a germinação, a irrigação foi elevada a 100% da capacidade de campo de cada solo.

O desbaste para 7 plantas por vaso foi efetuado aos 20 dias após o plantio.

3.3.3. Colheita e Análises Estatísticas

O experimento foi colhido aos 40 dias após a germinação. Quantificou-se o peso da parte aérea e do sistema radicular com o material vegetal seco em estufa a 60 - 70°C.

Todas as análises estatísticas foram efetuadas através de computador IBM 1130 da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais (35).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Mineralogia da Fração Argila

A identificação dos minerais existentes nas amostras da fração argila, (solos LR e LVE) foi feita somente pela difração dos raios X.

Embora nenhum outro meio de identificação tenha sido usado para confirmar a presença dos minerais (infravermelho e termo diferencial, por exemplo), os difractogramas apresentados no Quadro 4, sugerem a ocorrência da caolinita como mineral predominante na fração argila dos solos estudados, (7,0 e 3,57 A°), gibsitita (4,82 A°) e goetitita (4,14 A°).

A interpretação de que as reflexões de 7,16 e 3,58A° são devidas à presença da caolinita foi efetuada através de inferências do intenso intemperismo existente em solos de regiões tropicais (3,38, 52) e de pesquisas mais detalhadas em solos similares (47, 52).

As intensidades relativas dessas reflexões nas amostras com ferro (Figura 1, A e C), sugerem que o teor de caolinita é bem menor no LVE. Esta hipótese pode ser confirmada no Quadro 2 no qual se verifica que a fração argila possui teores de 11% no LVE e de 57% no LR.

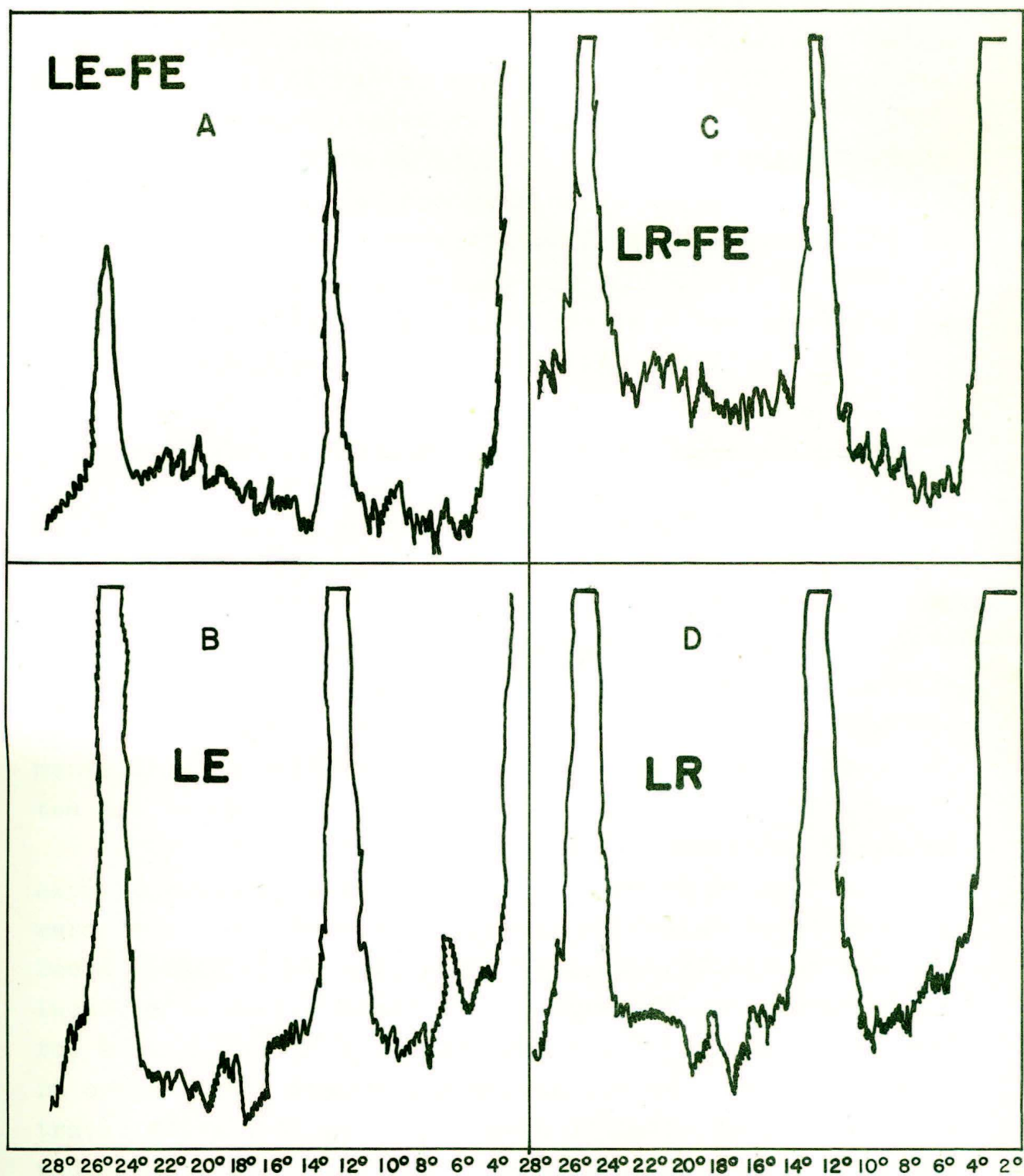


FIGURA 1 - Difractogramas de amostras de argilas do Latossolo Roxo, distrófico e Latossolo Vermelho Escuro, textura média, obtidos em Raio X.

Os picos de $4,82 \text{ \AA}^{\circ}$ (mais evidentes no difractograma com amostras livres de Fe) e de $4,14 \text{ \AA}^{\circ}$ indicam a provável presença da gibsitita e goetita, respectivamente. A afirmativa correta poderia ser feita caso houvesse outras análises. Todavia, como se trata de minerais muito comuns em solos de região tropical (38, 47, 52), esta hipótese tem probabilidades de estar correta.

Quanto ao pico de $13,8 \text{ \AA}^{\circ}$, obtido no difractograma do LVE, fração argila, com eliminação do Fe pelo ditionito de sódio, existe a possibilidade de ser vermiculita ou clorita, conforme especificado por JACKSON (36). Deve-se salientar que estudos mineralógicos em solos similares têm evidenciado a presença de vermiculita (52).

4.2. Sorção e Dessorção de Fósforo em Função do pH

4.2.1. Variação da Sorção de Fósforo com pH

Com os valores obtidos para sorção de fósforo em mg de P/g de solo efetuou-se uma análise de variância procurando equacionar-se os efeitos do pH e do solo na sorção de fosfatos (Quadro 3). Constatou-se um efeito altamente significativo (menor que 1%) para todos os componentes das fontes de variação.

Um dos princípios básicos da isoterma de Langmuir expõe que uma superfície sólida contém um determinado número de pontos capazes de possuir moléculas sorvidas (53). Desta forma, ao se equilibrar essa superfície com uma solução contendo o elemento a ser sorvido, no caso o fósforo, à temperatura constante, uma fração desses pontos será ocupada pelo fósforo. À medida que se aumenta a concentração dessa solução, aumenta-se o número de pontos ocupados, justificando a significância para P sorvido na análise de variância.

Como se observa no Quadro 4, com o aumento crescen

QUADRO 3 - Análise de Variância dos dados de P adsorvido em mg de P/g de solo para soluções com concentrações crescentes de P e pH variável.

Fonte de Variação	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F
Repetição	1	$0,315064 \times 10^{-5}$	$0,315064 \times 10^{-5}$	0,23
P Adsorvido	8	2,898200	0,362275	26418,94 ⁺⁺
pH	3	$0,450030 \times 10^{-2}$	$0,150010 \times 10^{-2}$	109,39 ⁺⁺
P ADs x pH	24	$0,374798 \times 10^{-2}$	$0,156166 \times 10^{-3}$	11,39 ⁺⁺
Solo	1	2,494798	2,494730	181.928,43 ⁺⁺
P ADs x solo	8	1,938240	0,242280	17.668,29 ⁺⁺
pH x Solo	3	$0,140169 \times 10^{-2}$	$0,467232 \times 10^{-3}$	34,07 ⁺⁺
P ADs x pH x Solo	24	$0,519019 \times 10^{-2}$	$0,216258 \times 10^{-3}$	15,77 ⁺⁺
Erro	71	$0,973604 \times 10^{-3}$	$0,137127 \times 10^{-4}$	
Total	143	7,347000		

C.V. = 1,87%

++ - significativo ao nível de 1%

te da solução de fósforo, 0 a 90 ppm, obtém-se, no LR e no LVE, aumentos sucessivos do fósforo sorvido.

No LVE, a partir de 60 ppm, ao pH natural do solo, observa-se um decréscimo na quantidade de fósforo sorvido, 60 ppm sorve 0,1295, a 75 ppm, 0,105 e 90 ppm, 0,092 mg de P/grama de solo. Neste mesmo solo, LVE, nas demais variações do pH inicial da suspensão, pH 6,0, 6,5 e 7,0, esse fenômeno não fica evidenciado. Ao contrário, no pH 6,0, a partir de 45 ppm até 75 ppm, observa-se uma ligeira estabilização do fósforo sorvido. No pH 6,5, a estabilização é observada de 30 a 60 ppm e, no pH 7,0, de 45 a 90 ppm. Além disso, as quantidades sorvidas foram menores do que ao pH natural do solo, justificando o efeito significativo para pH nas fontes de variação.

A explicação para esses fatos pode ser feita através de KITTRICK e JACKSON (43), quando citam que em altas concentrações de fósforo (1M) ocorrem reações de dissolução e precipitação de fósforo. A observação de que, para caolinita e gibsitita, o número de pontos de sorção aumenta até um determinado limite com o decréscimo do pH nas regiões I e II da isoterma de sorção (54), sugere a presença destas regiões (I e II), no LVE, até a concentração de 60 ppm.

A região III da isoterma de sorção para caolinita e gibsitita é linear. Essa linearidade indica que os pontos de sorção devem permanecer constantes mesmo que a quantidade de fósforo sorvido aumente. Este fato é observado no LVE nas demais variações do pH após a concentração de 60 ppm (Quadro 4), sugerindo a presença da região III conforme especificações de MULJADI et alii (54).

O Latossolo Roxo, com resultados distintos aos obtidos com o LVE, apresenta uma sorção sempre crescente com o aumento da concentração de fósforo, sugerindo a hipótese de que, nos dois solos estudados, os limites das três regiões das isotermas de sorção irão depender não só da

QUADRO 4 - Resultados para fósforo sorvido em mg de P/g do solo para soluções com concentrações crescentes de fósforo em quatro níveis de pH.

Fósforo Adicionado ppm	Fósforo Adsorvido mg de P/g de Solo							
	Latossolo Vermelho Escuro				Latossolo Roxo			
	pH inicial da solução							
	4,9	6,0	6,5	7,0	5,2	6,0	6,5	7,0
5,00	0,039	0,038	0,036	0,037	0,050	0,050	0,050	0,050
5,00	0,039	0,039	0,037	0,038	0,050	0,050	0,050	0,050
10,00	0,059	0,050	0,045	0,052	0,100	0,100	0,100	0,100
10,00	0,059	0,050	0,048	0,050	0,100	0,100	0,100	0,100
15,00	0,072	0,063	0,054	0,057	0,150	0,150	0,150	0,150
15,00	0,074	0,063	0,054	0,057	0,150	0,150	0,150	0,150
30,00	0,087	0,075	0,068	0,062	0,297	0,296	0,297	0,296
30,00	0,093	0,075	0,074	0,068	0,297	0,296	0,297	0,296
45,00	0,116	0,088	0,068	0,098	0,434	0,433	0,433	0,428
45,00	0,107	0,078	0,068	0,078	0,434	0,433	0,433	0,427
60,00	0,136	0,080	0,065	0,080	0,554	0,554	0,550	0,540
60,00	0,123	0,080	0,080	0,095	0,557	0,556	0,548	0,538
75,00	0,105	0,082	0,083	0,083	0,667	0,657	0,646	0,631
75,00	0,105	0,082	0,083	0,105	0,667	0,657	0,646	0,631
90,00	0,092	0,093	0,093	0,092	0,759	0,746	0,733	0,693
90,00	0,092	0,093	0,093	0,092	0,762	0,746	0,724	0,693

OBS.: Duas repetições correspondentes ao tratamento com 0 ppm de fósforo.

QUADRO 5 - Variação da capacidade máxima de sorção e da energia de sorção nos dois solos estudados em quatro diferentes pH.

Solo	pH	Equação	r	Sorção Máxima mg P/g	Energia de Sorção
LVE	4,9	$Y = 5,9187 + 9,7596 x$	0,985 ⁺⁺	0,10246	1,649
	6,0	$Y = 33,2894 + 11,1080 x$	0,995 ⁺⁺	0,09003	0,3337
	6,5	$Y = 54,3057 + 11,2916 x$	0,983 ⁺⁺	0,08856	0,2079
	7,0	$Y = 43,9946 + 10,4498 x$	0,985 ⁺⁺	0,09570	0,2375
LR	5,2	$Y = 0,6475 + 1,3374 x$	0,992 ⁺⁺	0,74769	2,065
	6,0	$Y = 0,6000 + 1,3671 x$	0,993 ⁺⁺	0,73150	2,278
	6,5	$Y = 0,6285 + 1,3996 x$	0,994 ⁺⁺	0,71448	2,228
	7,0	$Y = 0,6705 + 1,4640 x$	0,995 ⁺⁺	0,68310	2,183

++ - significativo ao nível de 1%.

natureza dos sorventes, como dos seus teores e do equilíbrio dinâmico entre eles. Assim, enquanto o LVE apresenta um máximo de sorção ao pH natural do solo, com 60 ppm de fósforo, no LR, este máximo é obtido a 90 ppm. Neste solo (LR), a sorção de fósforo foi sempre maior do que no LVE, justificando o efeito significativo para a interação entre o P sorvido e o solo, Quadro 4.

No Latossolo Roxo, em função do aspecto linear, não se caracteriza a região III das isotermas de sorção. Estas divergências de resultados entre o LR e o LVE podem ser estudadas sob diversos aspectos. Verifica-se, por exemplo, a importância do equilíbrio dinâmico entre os vários parâmetros (natureza do sorvente, pH, temperatura, metodologia de estudo, etc.), envolvidos na sorção de fósforo, dificultando a determinação daquele mais específico na sorção (69) e do aspecto quantitativo e qualificativo da natureza dos sorventes (54). Justifica-se, assim, o efeito significativo para o componente solo na análise de variância.

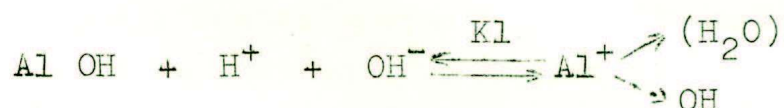
As variações apresentadas pela natureza dos sorventes podem ser verificadas através dos resultados apresentados por MULJADI *et alii* (54), nos quais a gibsite e a pseudobohemita tiveram uma sorção de fosfatos com menor reversibilidade do que a caolinita, nas regiões II e III das isotermas de sorção. Os limites das concentrações nessas regiões são as mesmas tanto para gibsite como para pseudobohemita e caolinita. Quando se compara a vermiculita com a montmorilonita verifica-se que a vermiculita sorve menos fosfatos quando se aumenta o pH, enquanto que a montmorilonita aumenta a sorção de fosfatos (30).

Estas observações teóricas sugerem que a natureza reativa do Al é diferente dentro de cada tipo de sorvente. Portanto, torna-se necessário observar que o Latossolo Roxo não apresenta efeitos do pH na sorção do fósforo até a concentração de 30 ppm. No Latossolo Vermelho Escu-

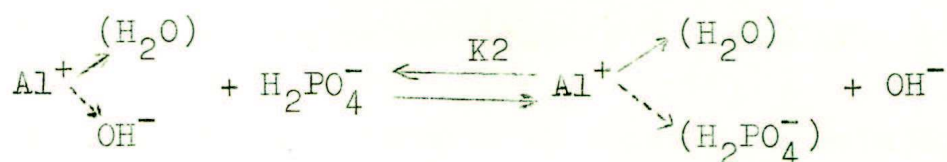
ro, a partir de 5 ppm já se nota efeito do pH na sorção, evidenciando o efeito significativo para a interação pH e P sorvido obtido na análise de variância (Quadro 3).

O processo de sorção na região I e II das isotermas de sorção para a caolinita deve ocorrer em etapas conforme as reações abaixo:

etapa I



etapa II



onde:

K1 é a constante de equilíbrio para a etapa I

K2 é a constante de equilíbrio para a etapa II.

O símbolo \nearrow indica ligação por coordenação e o símbolo \searrow indica ligação eletrovalente.

A etapa I é independente da etapa II (54). Desta forma, a retenção do fósforo na etapa II não interfere no equilíbrio da etapa I promovendo a formação de novos pontos de sorção. Havendo o deslocamento de equilíbrio, os pontos de sorção poderiam ser completamente preenchidos em qualquer valor para pH, com uma concentração suficientemente alta.

Com estas considerações teóricas, pode-se indicar que a não variação da sorção do P com o pH, até uma concentração de 30 ppm (LR), e de 5 ppm (LVE), sugere a possibilidade do número de cargas positivas não ter influenciado de tal forma a acusá-la. Acima destas concentrações, o fósforo adicionado, já suficientemente alto para preencher os pontos de sorção existentes, fornece a observação do efeito do pH na diminuição do teor do fósforo sorvido

(Figuras 2 e 3, Quadros 4 e 5). Este efeito é plenamente justificável na etapa II da reação de sorção, principalmente quando se analisa sob o aspecto da lei de LE CHATELIER: "Qualquer alteração nos fatores que determinam o equilíbrio de um sistema causa seu deslocamento no sentido de se opor a esta reação".

Os pontos de sorção, portanto, diminuem quando se aumenta o pH, justificando o efeito significativo para pH, obtido na análise de variância no Quadro 3.

No Quadro 5, verifica-se que a sorção máxima de fósforo diminui com a elevação do pH. Esses resultados estão em concordância com os obtidos por LEAL (47) e MULJADI et alii (54) para caolinita e gibsitita.

No LVE, entretanto, quando o pH inicial da solução de contacto era igual a 7,0, a sorção de fósforo aumentou, conforme se verifica no Quadro 4 e na isoterma de Langmuir (Figura 2), justificando a interação significativa para P sorvido, pH e solo. A sorção máxima, Quadro 5, decresce até o pH 6,5 (0,08856 mg P/ grama de solo), voltando a apresentar um acréscimo ao pH 7,0 (0,09570 mg de P/ grama de solo). Provavelmente, nessas condições tenha havido desenvolvimento ou estabilidade de outros mecanismos envolvidos na sorção.

A variação do pH da suspensão inicial com concentrações crescentes de fósforo, representada na Figura 4, permite observar que todos os níveis de pH na concentração de 0 ppm de fósforo apresentam um valor comum, em ambos os solos, em torno de 4,50. Este fato pode ser explicado pela influência do KCl 0,01 M favorecendo a liberação do alumínio trocável. Por outro lado, à medida que se aumenta a concentração de fósforo, a hidroxila liberada por substituição do $H_2PO_4^-$ na etapa II proposta por MULJADI et alii (54), deve elevar o pH. Verifica-se, todavia, que somente para o LVE, quando o pH inicial da solução era igual a 7,0, forneceu um pH final superior a 6,0, nas

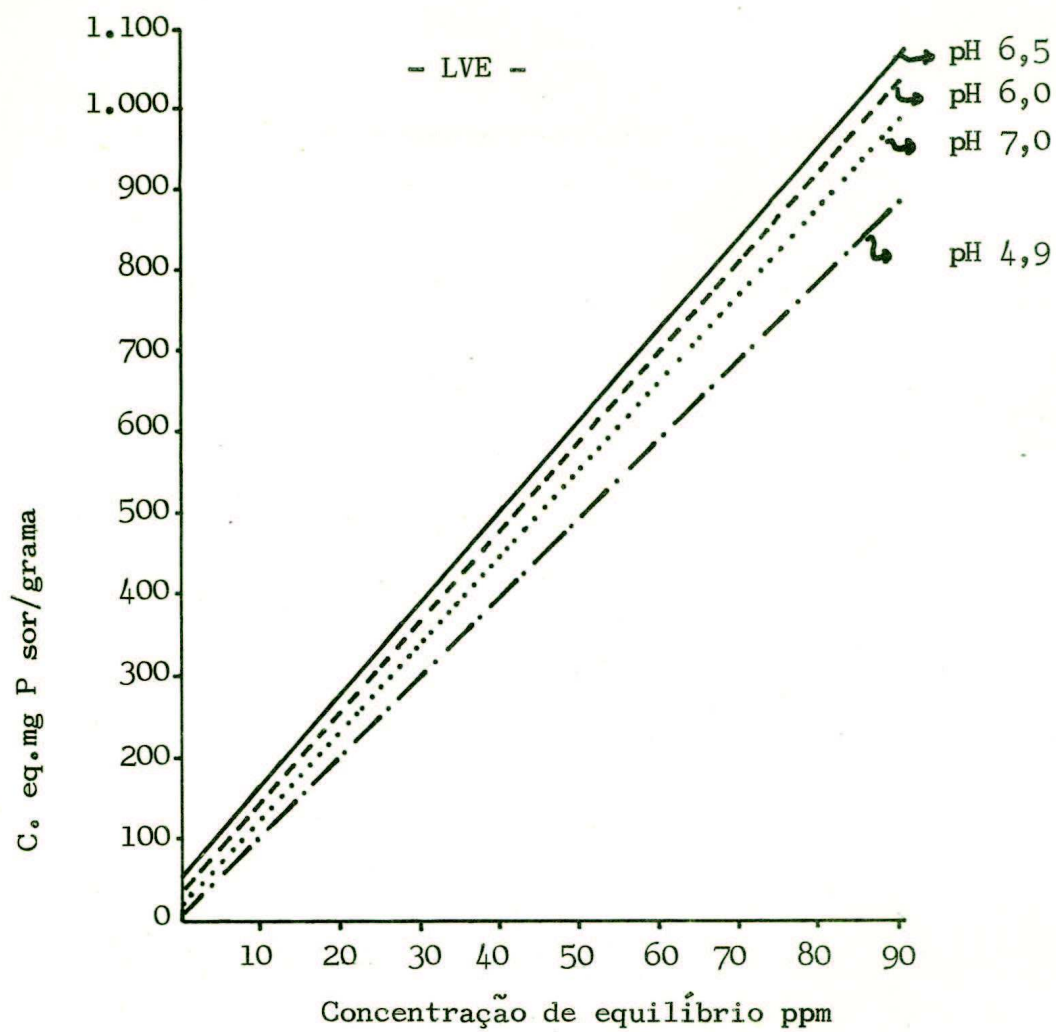


FIGURA 2 - Isotherma de Langmuir para sorção de fosfatos em função do pH da suspensão no Latossolo Vermelho Escuro textura média.

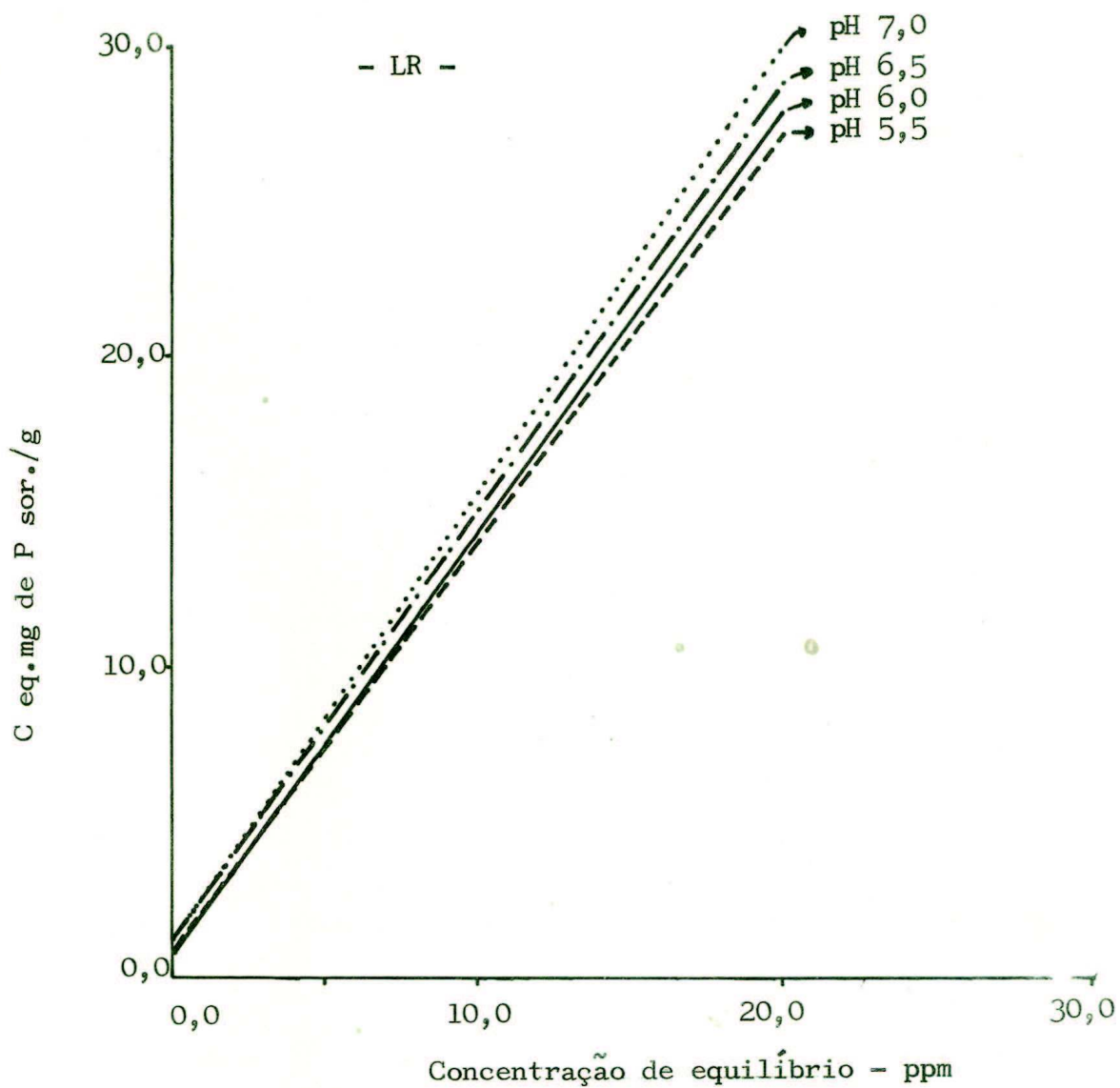


FIGURA 3 - Isotherma de Langmuir para a sorção de fósforo em função do pH da suspensão no solo Latossolo Roxo, distrófico.

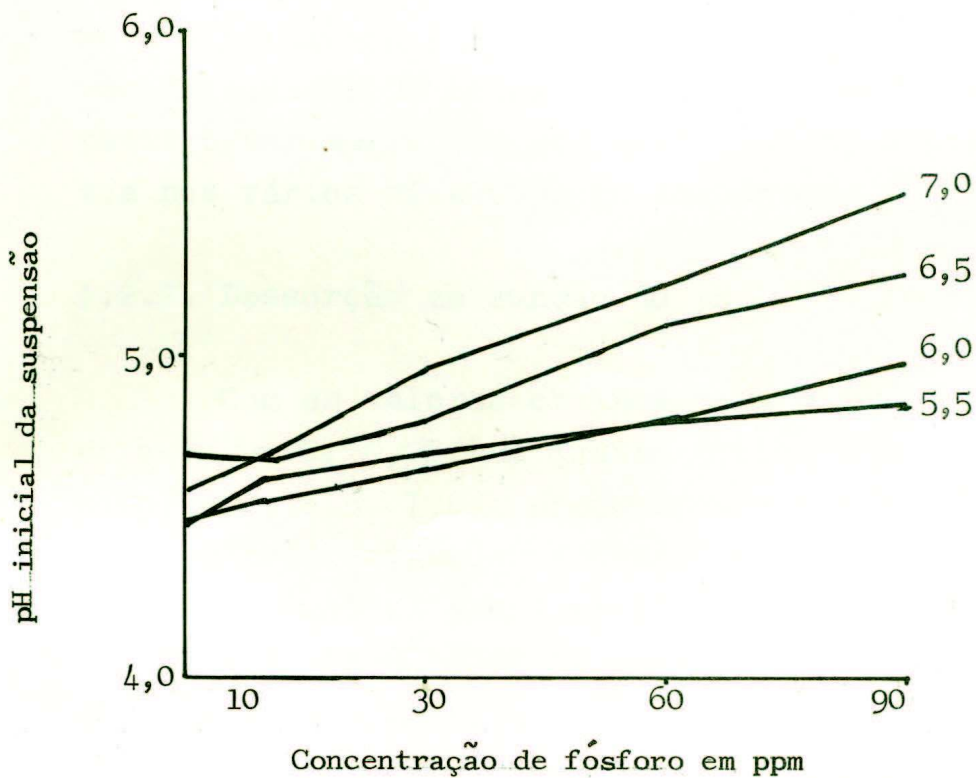
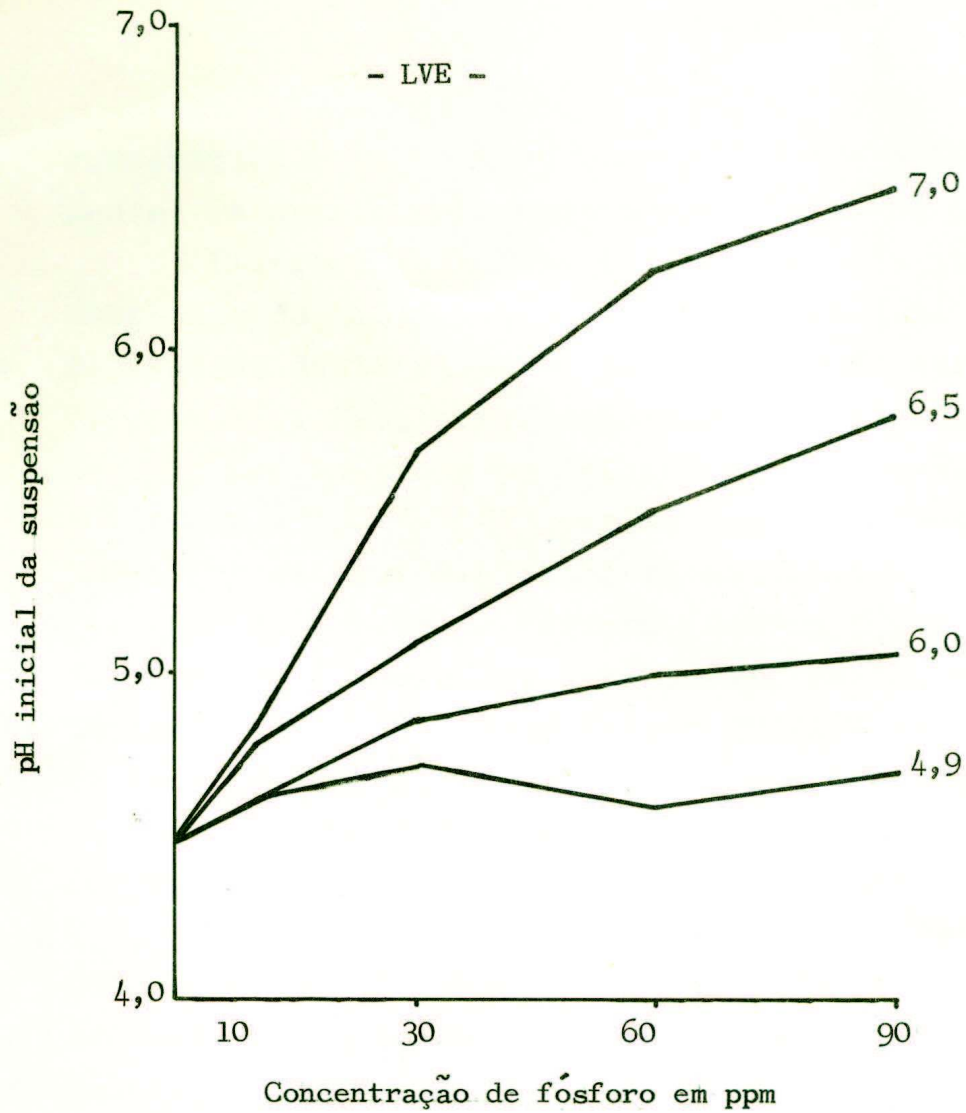


FIGURA 4 - Variação do pH inicial da solução de fósforo em equilíbrio com os solos LVE e LR, após reação com 18 horas de agitação.

concentrações de 60 e 90 ppm (pH 6,25 e 6,50), respectivamente. Os demais apresentaram-se abaixo de 6,0.

Diversos trabalhos de pesquisa têm indicado a necessidade da hidrólise do alumínio trocável para maior efetividade deste elemento nas reações de sorção de fósforo (16, 47). Esta observação teórica, aliada aos resultados obtidos quando o pH inicial da suspensão solo/solução foi igual a 7,0 no LVE, parece indicar a possibilidade da hidrólise do alumínio trocável estar contribuindo para a elevação da sorção de fósforo (Quadro 5), evitando a redução do pH (Figura 4). Deve haver, assim, uma etapa anterior à etapa I, proposta por MULJADI *et alii* (54), em se tratando da hidrólise de alumínio trocável, em função da natureza das superfícies de sorção. Todavia, esta hipótese deve ser pesquisada em maiores detalhes.

As Figuras 2 e 3 mostram uma boa adequação aos dados de sorção de fósforo, nos dois solos estudados, com a isoterma de Langmuir. Estes fatos poderiam indicar reações de sorção nas condições do experimento ressaltando-se as contradições apresentadas por LARSEN (46).

Analisando-se os valores obtidos para sorção máxima e o parâmetro K (energia de ligação), calculados através da equação de Langmuir na sua forma linear, vê-se repetir a variabilidade dos solos quanto à sorção de fosfatos nos vários níveis de pH estudados.

4.2.2. Dessorção em Função do pH

Com os valores obtidos para a dessorção de fósforo através de KCl 0,01 M em quatro diferentes pH (natural do solo, 6,0, 6,5, 7,0), efetuou-se uma análise de variância para as três extrações sucessivas. Os resultados, apresentados nos Quadros 6 e 7 demonstram efeitos altamente significativos para todos os componentes estudados, em ambos os solos.

QUADRO 6 - Análise de variância para os dados de três extrações sucessivas do fósforo sorvido, utilizando KCl 0,01 M em quatro níveis de pH no LVE.

Fontes de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F.
Repetição	1	$0,132227 \times 10^{-5}$	$0,132227 \times 10^{-5}$	2,23
P Dessorvido	8	$0,190166 \times 10^{-1}$	$0,237708 \times 10^{-2}$	40166,20 ⁺⁺
pH	3	$0,630826 \times 10^{-4}$	$0,210275 \times 10^{-4}$	35,53 ⁺⁺
P Des. x pH	24	$0,815074 \times 10^{-4}$	$0,339614 \times 10^{-5}$	5,74 ⁺⁺
Dessorção	2	$0,219502 \times 10^{-1}$	$0,109751 \times 10^{-1}$	18544,94 ⁺⁺
P Des. x Des.	16	$0,121713 \times 10^{-1}$	$0,760798 \times 10^{-3}$	1285,39 ⁺⁺
pH x Des.	6	$0,469494 \times 10^{-3}$	$0,782490 \times 10^{-4}$	132,22 ⁺⁺
P Des. x pH x Des.	48	$0,304299 \times 10^{-3}$	$0,633957 \times 10^{-5}$	10,71 ⁺⁺
Erro	107	$0,633238 \times 10^{-4}$	$0,591811 \times 10^{-6}$	
Total	215	$0,541212 \times 10^{-1}$		

C.V. = 3,50%

++ - significativo ao nível de 1%.

QUADRO 7 - Análise de variância para os dados de três extrações sucessivas de fósforo adsorvido, utilizando KCl 0,01 M, em quatro níveis de pH, no LR.

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	S.Q.	F.
Repetição	1	$0,118519 \times 10^{-7}$	$0,118519 \times 10^{-7}$	0,73
P Dessorvido	8	$0,587764 \times 10^{-1}$	$0,734706 \times 10^{-2}$	45234,95 ⁺⁺
pH	3	$0,106989 \times 10^{-3}$	$0,356632 \times 10^{-4}$	219,57 ⁺⁺
P Dessorvido	24	$0,225442 \times 10^{-3}$	$0,939342 \times 10^{-5}$	57,83 ⁺⁺
Dessorção	2	$0,330630 \times 10^{-2}$	$0,165315 \times 10^{-2}$	10178,24 ⁺⁺
P Des. x Des.	16	$0,719274 \times 10^{-2}$	$0,449546 \times 10^{-3}$	2767,80 ⁺⁺
pH x Des.	6	$0,101690 \times 10^{-3}$	$0,169484 \times 10^{-4}$	104,34 ⁺⁺
P Des. x pH Des.	48	$0,200278 \times 10^{-3}$	$0,417246 \times 10^{-5}$	25,69 ⁺⁺
Erro	107	$0,173790 \times 10^{-4}$	$0,162320 \times 10^{-6}$	
Total	215	$0,699273 \times 10^{-1}$		

C.V. = 3,10%

++ - significativo ao nível de 1%.



Examinando-se os Quadros 8 e 9, verifica-se uma crescente reversibilidade do fosfato em relação à concentração para cada solo estudado, o que é comprovado estatisticamente pelo efeito significativo para P dessorvido. A medida que o solo se encontra mais saturado com fósforo, maior é a dessorção, conforme já comprovado por diversos autores, FASSBENDER (18), LEAL (47) e MULJADI et alii (54).

Deve-se salientar o comportamento distinto do LR e do LVE. O primeiro, apesar de apresentar uma maior capacidade de sorção, sua dessorção é bem menor que no LVE. Na concentração mais elevada, a pH 7,0, o LR apresenta apenas 21,08% de fósforo dessorvido em relação ao total sorvido. Nestas mesmas condições, o LVE apresenta um valor de 91,79% (Quadros 9 e 11).

Resultados semelhantes, com baixa dessorção de fosfatos, foram encontrados por FASSBENDER (18) e LEAL (47).

Esta reversibilidade do fosfato em função da concentração é explicada por MULJADI et alii (54), quando apresentam três regiões energeticamente distintas para caolinita e para dois óxidos de alumínio. A reversibilidade decresce da região III para a Região I.

É interessante observar que o LR possui teores bem mais elevados de óxidos de ferro e alumínio e argila (caolinita) do que o LVE (Quadros 1 e 2). Numa análise detalhada dos resultados apresentados nos Quadros 8 e 9, pode-se notar que o LR apresenta duas regiões distintas na sorção: uma até 30 ppm, na qual não se verifica reversibilidade e nem efeito do pH, a outra, a partir de 30 ppm, com reversibilidade crescente em função da concentração e do pH.

Quanto ao LVE, Quadros 10 e 11, observa-se, desde a concentração de 5 ppm, reversibilidade crescente tanto em função da concentração como do pH.

A sorção na região I (para caolinita e gibsitita), a

QUADRO 8 - Resultados obtidos para três dessorções sucessivas com KCl 0,01 M em quatro níveis de pH do Latossolo Roxo.

P Adicio- nado ppm	1. ^a Dessorção - mg P/g solo				2. ^a Dessorção - mg P/g solo				3. ^a Dessorção			
	pH				pH				pH			
	5,2	6,2	6,5	7,0	5,2	6,0	6,5	7,0	5,2	6,0	6,5	7,0
5,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30,00	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
30,00	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003
45,00	0,012	0,012	0,015	0,013	0,010	0,010	0,010	0,012	0,007	0,008	0,008	0,008
45,00	0,012	0,012	0,014	0,013	0,010	0,010	0,010	0,012	0,007	0,008	0,008	0,009
60,00	0,029	0,027	0,031	0,029	0,019	0,019	0,019	0,024	0,015	0,016	0,016	0,016
60,00	0,027	0,028	0,031	0,030	0,019	0,020	0,020	0,022	0,015	0,014	0,016	0,016
75,00	0,045	0,045	0,053	0,048	0,028	0,031	0,031	0,037	0,022	0,022	0,025	0,024
75,00	0,045	0,045	0,052	0,049	0,029	0,031	0,031	0,036	0,022	0,022	0,023	0,024
90,00	0,065	0,065	0,081	0,070	0,038	0,039	0,040	0,046	0,027	0,028	0,031	0,030
90,00	0,065	0,065	0,081	0,070	0,038	0,039	0,040	0,046	0,028	0,029	0,031	0,030

OBS.: A análise de variância foi efetuada usando o nível de 0 ppm de P adicionado e com 4 números na casa decimal.

QUADRO 9 - Resultados obtidos para o total de fósforo desorvido e sua relação em função do total sorvido, em quatro níveis de pH no Latossolo Roxo, distrófico.

P Adicio nado ppm	Total desorvido mg P/g				% desorvido em função sorvido			
	pH				pH			
	5,2	6,0	6,50	7,0	5,2	6,0	6,5	7,0
5,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30,00	0,008	0,009	0,010	0,008	2,690	3,040	3,360	2,700
30,00	0,008	0,009	0,010	0,009	2,690	3,040	3,370	3,030
45,00	0,029	0,030	0,033	0,033	6,680	6,920	7,620	7,710
45,00	0,029	0,030	0,032	0,034	6,670	6,920	7,390	7,480
60,00	0,063	0,062	0,066	0,070	11,380	11,200	12,000	12,970
60,00	0,061	0,062	0,067	0,068	10,940	11,150	12,220	12,650
75,00	0,095	0,098	0,109	0,109	14,250	14,920	16,860	17,280
75,00	0,096	0,098	0,106	0,109	14,400	14,920	16,400	17,280
90,00	0,130	0,132	0,152	0,146	17,130	17,690	20,730	21,080
90,00	0,130	0,132	0,152	0,146	17,130	17,690	20,730	21,080

QUADRO 10 - Resultados obtidos para 3 dessorções sucessivas com KCl 0,01 M em quatro níveis de pH no Latossolo Vermelho Escuro, textura média⁺.

P Adicio nado ppm	1. ^a Dessorção				2. ^a Dessorção				3. ^a Dessorção			
	pH				pH				pH			
	4,9	6,0	6,5	7,0	4,9	6,0	6,5	7,0	4,9	6,0	6,5	7,0
5,00	0,004	0,004	0,006	0,005	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002
5,00	0,004	0,004	0,006	0,005	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002	0,002
10,00	0,010	0,011	0,011	0,011	0,004	0,004	0,005	0,005	0,003	0,002	0,003	0,004
10,00	0,010	0,010	0,012	0,011	0,004	0,004	0,004	0,005	0,003	0,002	0,002	0,004
15,00	0,017	0,017	0,019	0,019	0,006	0,010	0,005	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004
15,00	0,017	0,017	0,019	0,019	0,007	0,011	0,005	0,006	0,004	0,003	0,003	0,004
30,00	0,025	0,027	0,031	0,027	0,010	0,018	0,009	0,008	0,005	0,005	0,004	0,005
30,00	0,025	0,025	0,031	0,027	0,010	0,016	0,009	0,009	0,005	0,005	0,004	0,006
45,00	0,034	0,036	0,038	0,036	0,012	0,020	0,010	0,012	0,006	0,006	0,005	0,007
45,00	0,036	0,038	0,038	0,036	0,012	0,017	0,009	0,010	0,006	0,006	0,004	0,006
60,00	0,047	0,043	0,047	0,047	0,014	0,022	0,011	0,012	0,007	0,006	0,006	0,009
60,00	0,041	0,045	0,045	0,045	0,013	0,022	0,010	0,013	0,007	0,007	0,005	0,007
75,00	0,050	0,050	0,054	0,052	0,015	0,024	0,013	0,013	0,007	0,007	0,006	0,008
75,00	0,052	0,050	0,054	0,052	0,015	0,023	0,012	0,013	0,007	0,007	0,006	0,008
90,00	0,057	0,052	0,060	0,060	0,015	0,027	0,014	0,014	0,009	0,007	0,007	0,009
90,00	0,057	0,055	0,060	0,060	0,016	0,026	0,014	0,016	0,008	0,007	0,007	0,009

+ - A análise de variância foi efetuada usando-se o nível de 0 ppm de fósforo adicionado e com 4 números na casa decimal.

QUADRO 11 - Resultados obtidos para o total de fósforo desorvido; sua relação em função do total sorvido em quatro níveis de pH no Latossolo Vermelho Escuro, testura média.

P Adicio nado ppm	Total desorvido mg P/g				% desorvido em função sorvido			
	pH				pH			
	4,9	6,0	6,5	7,0	4,9	6,0	6,5	7,0
5,0	0,008	0,007	0,010	0,010	20,30	18,13	26,18	26,95
5,0	0,008	0,007	0,010	0,010	20,30	17,68	27,17	26,60
10,0	0,017	0,017	0,019	0,020	28,57	33,93	41,76	38,09
10,0	0,017	0,016	0,018	0,020	28,57	31,94	37,58	39,92
15,0	0,027	0,031	0,028	0,029	37,66	48,90	51,66	50,79
15,0	0,028	0,031	0,027	0,029	37,63	48,90	49,81	50,79
30,0	0,040	0,050	0,044	0,040	46,08	66,93	64,93	64,83
30,0	0,040	0,046	0,044	0,042	43,20	61,58	58,74	61,49
45,0	0,052	0,062	0,053	0,055	44,67	70,45	78,06	56,29
45,0	0,054	0,061	0,051	0,052	50,37	78,20	75,11	66,67
60,0	0,068	0,071	0,064	0,068	49,82	88,42	98,46	84,68
60,0	0,061	0,074	0,060	0,065	49,51	92,15	74,53	68,28
75,0	0,072	0,081	0,073	0,073	68,77	97,94	88,27	88,27
75,0	0,074	0,080	0,072	0,073	70,68	96,73	87,06	69,72
90,0	0,081	0,086	0,081	0,083	87,47	92,87	87,38	89,63
90,0	0,081	0,088	0,081	0,085	87,47	95,03	87,38	91,79

presenta maior energia de sorção, reversibilidade em função do pH e não em função da concentração. As regiões II e III, com menor energia de retenção, apresentam reversibilidade em função do pH e da concentração (54). Baseando-se nesses aspectos teóricos, não se consegue caracterizar a região I, conforme especificado por MULJADI et alii (54). Provavelmente esse fenômeno esteja ligado aos teores das superfícies sorventes e da heterogeneidade do material em estudo.

Um outro ponto a salientar é a queda do teor de fósforo dessorvido com as sucessivas extrações nos dois solos, evidenciado pelo efeito significativo para a interação P-dessorvido (teor) e dessorção (etapa). A quantidade de P dessorvido, sendo maior na 1.^a extração, decrescendo na 2.^a e, ainda menor na 3.^a extração (Quadros 8 e 11), explica o efeito significativo para dessorção. Resultados semelhantes foram obtidos por LEAL (47), FRIED e SHAPIRO (27), FASSBENDER (18).

Ao se analisarem os resultados da dessorção de fósforo em função do pH (Quadros 8 e 10), pode-se verificar o comportamento totalmente distinto para os solos estudados. No Latossolo Roxo, a primeira dessorção foi mais efetiva (em concentrações acima de 30 ppm) ao pH 6,5. A segunda dessorção, ao pH 7,0 e, na terceira, já se nota tendência à estabilidade em relação ao pH. Todavia, ao se analisar em termos de percentagem de fósforo dessorvido em função do total, Quadro 9, o teor de P dessorvido aumentou à medida que se aumentava o pH. Estes resultados não se justificam pela energia de ligação obtida pela isoterma de Langmuir, Quadro 5. O menor valor para esta constante foi obtida ao pH natural do solo (2,065), seguindo-se pH 7,0 (2,183), pH 6,5 (2,228), e pH 6,0 (2,278).

Esses resultados não concordam com os obtidos por LEAL (47) ao apresentar a tendência da maior dessorção estar associada a menores valores para a energia de liga-

ção.

Em se tratando de solo, a heterogeneidade das superfícies sorventes e do equilíbrio dinâmico entre eles dificulta sobretudo a obtenção de resultados semelhantes. Cada superfície sorvente deve possuir uma energia de sorção específica com características distintas para dessorção. É justo, no momento, relembrar que a dessorção para óxidos de alumínio apresenta menor reversibilidade do que a caolinita, com respeito à concentração (54).

Quanto ao LVE, os resultados das três dessorções apresentadas nos Quadros 10 e 11 indicam haver um maior teor de fósforo dessorvido ao pH 6,5 na primeira dessorção. Ao pH 6,0, na segunda dessorção e, na terceira, análogo ao LR, uma estabilidade com relação ao pH. Entretanto, ao se analisar o fósforo em termos de porcentagem ao total sorvido, verifica-se (Quadro 11), haver uma maior dessorção ao pH 7,0 até a concentração de 15 ppm (50,79%) e menor ao pH natural do solo (37,66%). Para concentrações acima de 15 ppm, o pH 6,0 apresenta-se mais efetivo na dessorção. Na concentração de 75 ppm, por exemplo, há uma dessorção de 97,94% para esse pH. Para os demais pH, o valor máximo é de 88,27%. Essas observações justificam os efeitos significativos para pH e suas interações, conforme obtidos na análise de variância (Quadro 6).

Esta variabilidade do número de extrações em função do pH provavelmente esteja ligada aos sorventes e às regiões de sorção. Para que haja dessorção de ânion sorvido, segundo Hingston *et alii*, citados por LEAL (47), é necessário tornar a carga da superfície sorvente mais negativa do que o valor em que ocorreu sua sorção.

Por outro lado, ao se analisar as sucessivas extrações do fósforo sorvido, espera-se uma mudança da região III para a II e desta, para a I. A irreversibilidade do fosfato em relação à concentração tem sido explicada como uma mudança de fase ao se reduzir a concentração de fósforo através de extrações sucessivas.

4.3. Efeitos da Adubação Fosfatada em Níveis de Sorção Máxima

4.3.1. Nas Formas de Fósforo no Solo

O efeito da calagem sobre a sorção e disponibilidade de fósforo deve ser considerada sob o aspecto da neutralização do alumínio trocável, efeito do pH sobre a reatividade dos óxidos hidratados de ferro e de alumínio, saturação com cálcio e de equilíbrio nutricional entre Ca, Mg e P.

Quanto ao alumínio trocável, os resultados obtidos através da extração com KCl 1 M indicam uma queda de seu teor com a calagem e com a adubação fosfatada em ambos os solos, Quadro 1A, com conseqüente aumento do pH, Figura 4. Esta diminuição do teor de alumínio trocável com aumento da adubação fosfatada refere-se à sua reação com o fósforo, conforme evidenciado por diversos autores (6, 16 e 54).

Convencionalmente, a equação:



pode explicar a formação de fosfatos de ferro e de alumínio com a solubilidade em função do pH. Deste modo, com o aumento da atividade da hidroxila, os fosfatos de ferro ou de alumínio apresentam-se na sua forma solúvel. Com o decréscimo da atividade do OH^- ou com o aumento da atividade do ion PO_4^{---} , a tendência para a formação de fosfatos de ferro e de alumínio é aumentada (7). Por outro lado, com a elevação do pH e do teor de Ca no solo, há formação de uma série de compostos fosfatados de cálcio, insolúveis e bastante heterogêneos (31, 39, 46, 61). Desta forma, ao se elevar o pH e o nível de cálcio e magnésio no solo, espera-se uma variação das formas de fósforo no so-

lo (P-solúvel em NH_4Cl , P-Fe, P-Ca e P-Al).

Ao se analisar os Quadros 12 e 13 verifica-se, tanto no LR como no LVE, apenas a variação das formas de P no solo em relação ao aumento da concentração de fósforo. Ressalta-se, todavia, o fato da análise de variância ter apresentado um coeficiente da variação bastante elevado, dificultando uma conclusão satisfatória. Entretanto, resultados obtidos por Ensminger, citado por PEARSON (59), permitem inferir a possibilidade de ser necessário um maior tempo de reação do fósforo no solo para se alcançar um equilíbrio entre as diversas formas. Conforme explicado pelo autor, após aplicar superfosfato por um período de 12 anos em vários solos, com e sem calagem, verificou-se que o fosfato extraído com NH_4F foi de 30 a 60% maior nos solos sem calagem, indicando a existência de maior teor de P-Al.

Através dos Quadros 12 e 13 também se observa a predominância das formas solúveis em NH_4F 0,5 N, pH 8,2, com respostas lineares ao aumento da concentração de fósforo, tanto para o LVE como para o LR. No LVE o aumento obtido nessa forma solúvel em NH_4F com 102,47 mg de P/1000 gramas de solo foi cerca de 7 a 9 vezes maior do que no tratamento sem adubação; para o LR, a mesma forma apresenta um aumento de 40 a 50 vezes com 747,67 mg de P/1000 gramas de solo.

As demais formas (NH_4Cl , NaOH e H_2SO_4) pouco variaram com o aumento do fósforo (cerca de duas vezes para NH_4Cl e 0,5 para NaOH e H_2SO_4) no LVE.

Quanto ao LR, as formas de fósforo solúveis em NH_4Cl aumentaram cerca de 6 a 9 vezes quando adubado com 747,67 mg de P/1000 g de solo. No mesmo nível de adubação, as formas solúveis em NaOH aumentaram cerca de 4 a 6 vezes e, em H_2SO_4 , cerca de 3 vezes.

Esta maior efetividade de alumínio em reter o fósforo tem sido citada por diversos autores (26, 47, 69). To

QUADRO 12 - Formas de fósforo em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no LVE - média de quatro repetições

Calagem mg/1000 g	Fósforo mg/1000 g	Formas de fósforo solúvel em:			
		NH ₄ Cl	NH ₄ F	NaOH	H ₂ SO ₄
0,0	0,00	3,55	7,54	6,39	3,37
	25,62	3,72	19,26	7,10	4,39
	51,24	4,52	40,38	7,00	6,30
	76,86	6,21	54,58	8,25	5,70
	102,47	8,07	65,94	8,52	5,86
386,0	0,00	2,48	6,39	3,90	5,15
	25,62	3,72	21,12	5,32	4,39
	51,24	4,26	35,94	6,39	9,78
	76,86	4,97	50,85	7,37	8,80
	102,47	8,07	64,59	7,80	7,34
637,0	0,00	2,92	8,69	3,81	5,41
	25,62	2,39	21,56	3,99	6,74
	51,24	3,90	33,27	4,88	6,83
	76,86	4,17	47,12	5,94	7,89
	102,47	5,76	62,57	8,07	7,99
889,0	0,00	2,13	8,07	3,73	5,05
	25,62	3,99	23,25	4,88	8,78
	51,24	4,43	37,80	5,85	9,14
	76,86	5,39	48,54	6,92	8,16
	102,47	5,94	60,26	7,36	8,78

davia, torna-se necessário conhecer as formas mais ativas no fornecimento deste elemento às plantas. No presente trabalho não se procurou equacionar este problema. Os re-

QUADRO 13 - Formas de fósforo em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no solo LR. Média de 4 repetições

Calagem mg/1000 g	Fósforo mg de P/ 1000 g	Formas de fósforo solúvel em:			
		NH ₄ Cl	NH ₄ F	NaOH	H ₂ SO ₄
0,0	0,00	2,39	12,16	14,90	12,06
	186,92	3,55	124,69	37,80	21,56
	373,84	6,74	234,74	56,36	26,36
	560,76	11,09	398,49	69,67	31,59
	747,67	15,97	504,10	73,22	37,98
1.135,0	0,00	2,04	11,18	15,61	10,82
	186,92	4,17	108,89	38,07	20,59
	373,84	7,01	245,83	55,82	25,91
	560,76	10,89	380,29	77,39	32,75
	747,67	18,99	554,24	82,71	37,71
2.425,0	0,00	2,13	10,73	11,80	12,78
	186,92	3,10	100,64	37,09	23,51
	373,84	6,38	239,62	55,47	31,41
	560,76	11,09	349,23	66,56	32,39
	747,67	18,81	498,33	79,26	39,85

sultados obtidos por FASSBENDER *et alii* (21), para solos da América Central, demonstram que somente há participação dos fosfatos solúveis em NH₄Cl 1N em solos onde há predominância de ferro e de alumínio. Já para solos com predominância de cálcio, os autores obtiveram participação significativa ao nível de 1% para a fração solúvel em NH₄Cl e a 5% para as frações de fosfatos solúveis em NH₄F e H₂SO₄ e do fósforo em forma orgânica.

4.3.2. Nas Produções da Parte Aérea e do Sistema Radicular e Absorção de Fósforo no LVE

Objetivando estudar os efeitos da adubação fosfatada, baseada em níveis de sorção máxima, na cultura do sorgo e no Latossolo Vermelho Escuro, foram quantificadas as produções da parte aérea, do sistema radicular e absorção total de fósforo. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 14. Através da análise de variância destes dados, Quadro 15, verifica-se um efeito altamente significativo para níveis de adubação fosfatada, de calagem e a interação entre ambas, como fatores importantes nas variações de produções.

Freqüentemente, as plantas cultivadas em solos ácidos apresentam sintomas de deficiência em fósforo relacionados à toxidez de alumínio (24, 25), à deficiência dos solos em Ca, Mg e em outros elementos nutritivos ou mesmos aos efeitos antagônicos de Al à absorção de Ca e Mg.

Conforme já discutido, o excesso de alumínio trocável pode reduzir a solubilidade do fósforo no solo, com conseqüente diminuição na absorção e transporte deste elemento pelas plantas. Uma adição de fósforo, em quantidades suficientes, pode precipitar o alumínio e eliminar um efeito nocivo, favorecendo a absorção e transporte de fósforo. Assim, uma análise das Figuras 5 e 6, leva a concluir pelo efeito da calagem no aumento da produção da parte aérea e do sistema radicular, no mesmo nível de adubação fosfatada.

Ao se aumentar, portanto, o nível de Ca e Mg no solo, as produções estudadas aumentaram consideravelmente em todos os níveis de fósforo, partindo-se de uma produção praticamente nula sem adição de Ca e Mg.

Estes fatos poderiam ser abordados tanto pela eliminação do teor de alumínio trocável como pelo fornecimento de Ca e Mg limitantes à produção. Será difícil, no pre

QUADRO 14 - Produção da parte aérea e dos sistema radicular do sorgo (Sorghum vulgare, Pers.) em quadro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Vermelho Escuro

Calagem mg/1000 g	Fósforo mg/1000 g	Produção da parte aérea mg/1000 g	Produção do sistema ra- dicular mg/1000 g
0,0	0,00	27,50	17,50
	25,62	90,00	45,00
	51,24	137,50	67,50
	76,86	242,50	70,00
	102,47	387,50	110,00
386,00	0,00	232,50	162,50
	25,62	842,50	450,00
	51,24	1.070,00	727,50
	76,86	1.182,50	862,50
	102,47	1.190,00	757,50
637,00	0,00	214,00	167,50
	25,62	1.237,50	707,50
	51,24	1.570,00	1.085,00
	76,86	1.775,00	1.205,00
	102,47	1.775,00	1.260,00
889,00	0,00	237,50	195,00
	25,62	1.670,00	982,50
	51,24	1.752,50	1.045,00
	76,86	1.890,00	1.302,50
	102,47	2.090,00	1.692,50

sente trabalho, distinguir a verdadeira interferência. Sa-
be-se, no entanto, que o alumínio trocável diminui sensi-
velmente com o aumento da calagem, Quadro 1A, e com a adu

$$Y = -89,9696 + 8,66155P - 0,075005P^2 + 0,952934C - 0,0006193C^2 + 0,0138418PC$$

$$R^2 = 0,967632$$

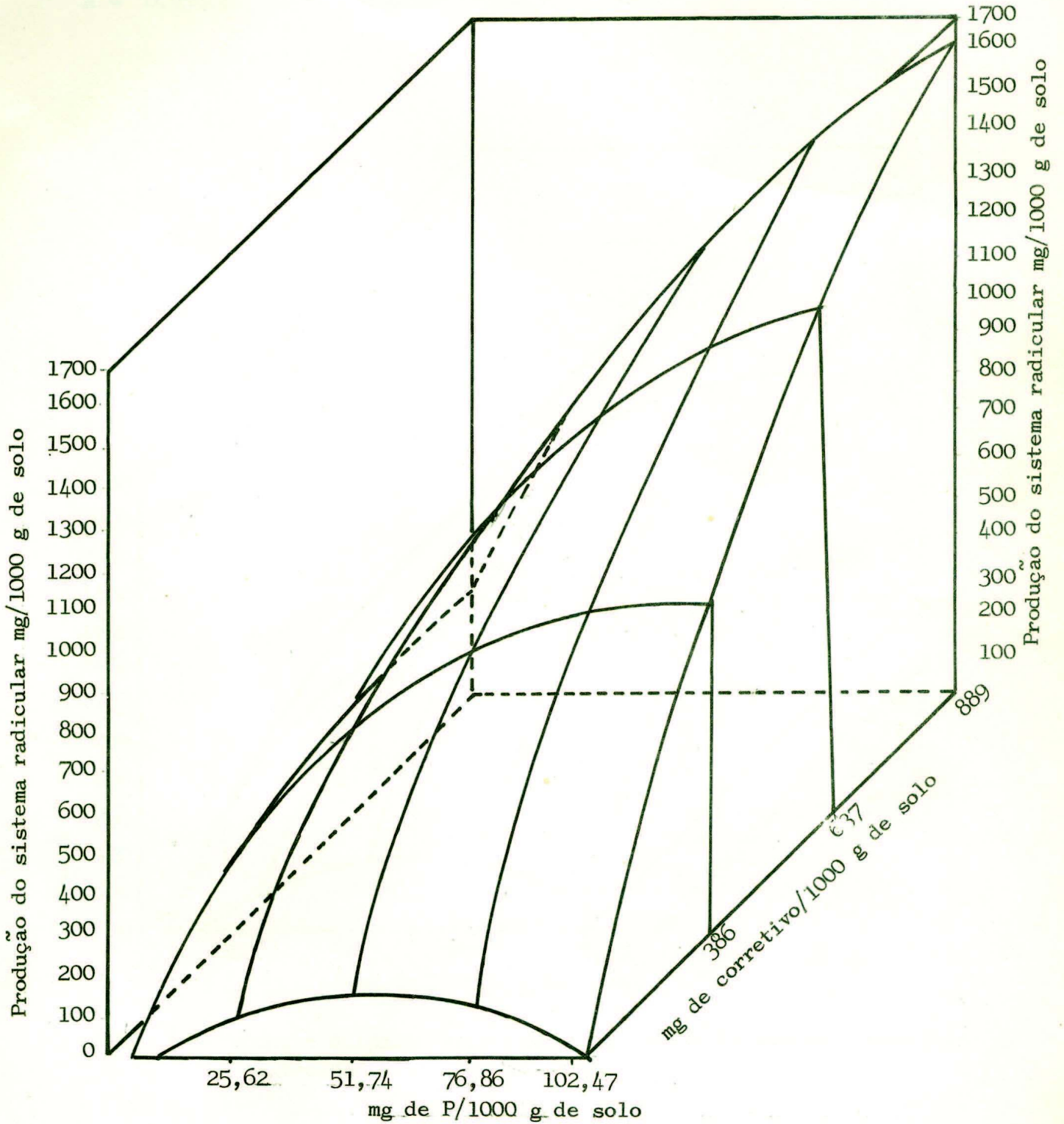


FIGURA 5 - Produção de raízes em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada. LVE

$$Y = -218,578 + 19,4956P - 0,154584P^2 + 1,55316C - 0,000837C^2 + 0,014218PC$$

$$R^2 = 0,939445$$

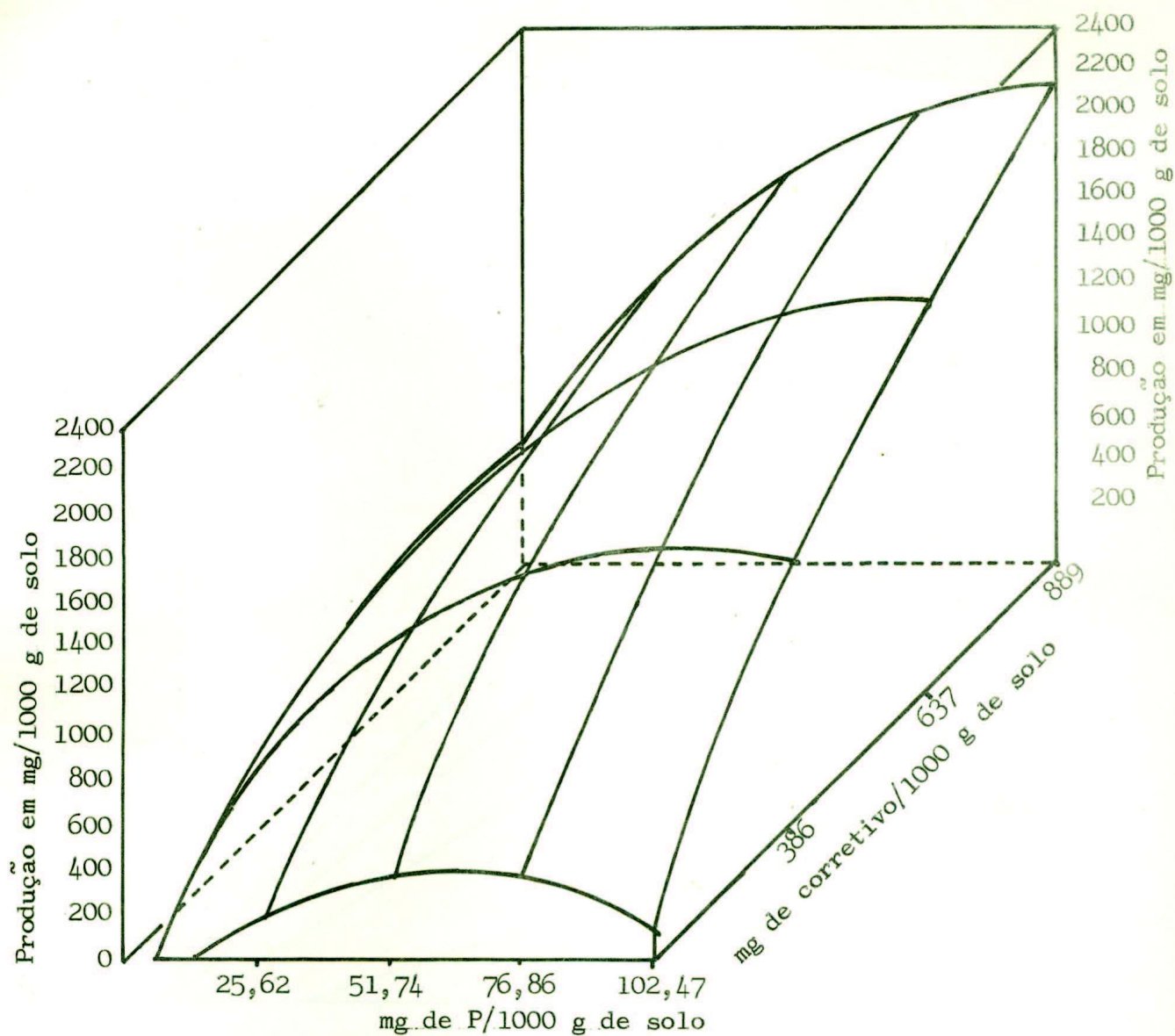


FIGURA 6 - Produção da parte aérea em cinco níveis de adubação fosfatada e quatro de calagem no solo LVE

$$Y = - 0,359775 + 0,0234469 P + 0,0007292 C + 0,00005655 PC$$

$$R^2 = 0,950534$$

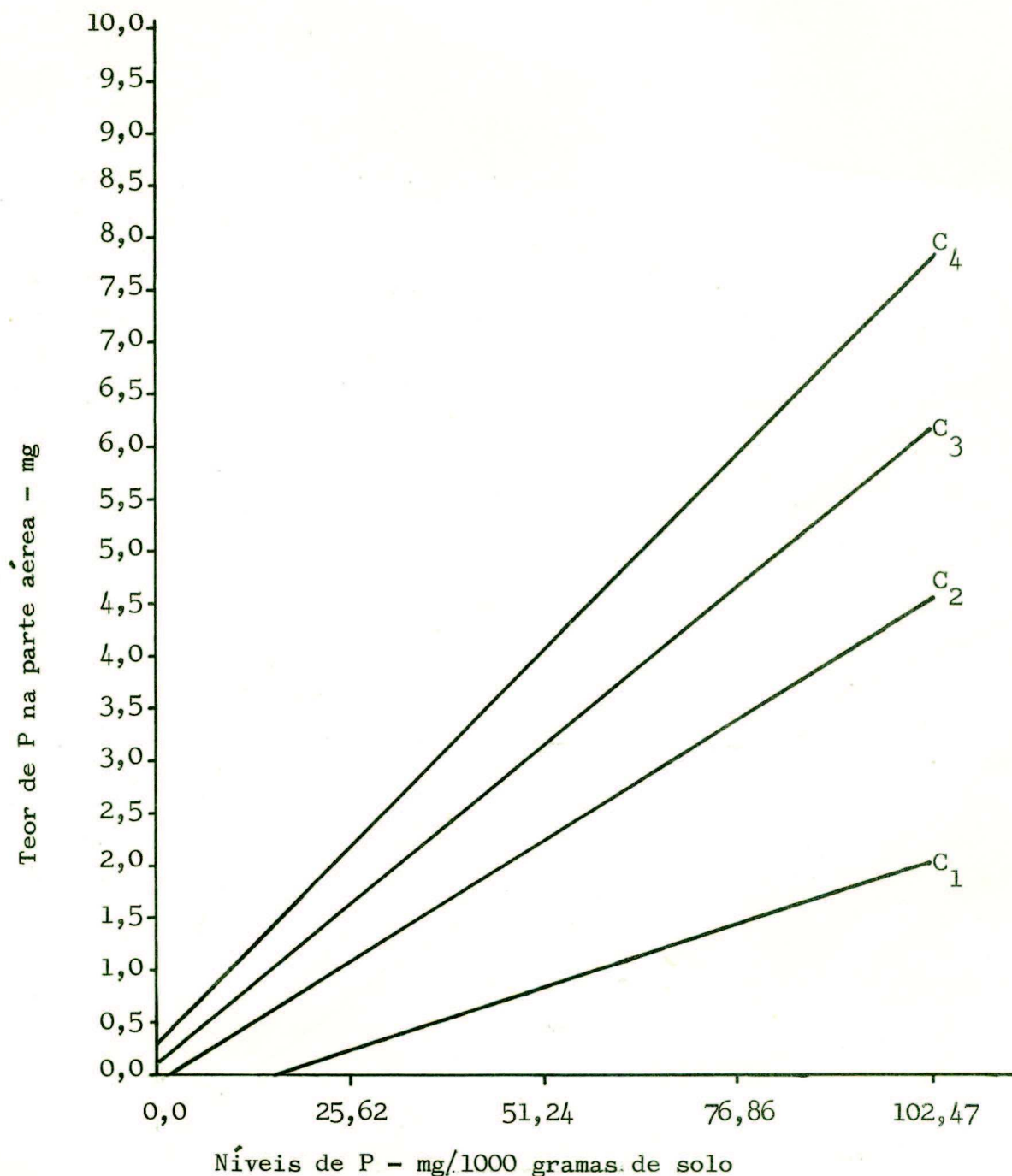


FIGURA 7 - Teor de fósforo na parte aérea em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no solo Latossolo Vermelho Escuro. C₁ = 0,00; C₂ = 386,0; C₃ = 637,0 e C₄ = 889,0 mg de corretivos/1000 gramas de solo.

$$Y = -0,17887 + 0,0100849 P - 0,0000529 P^2 + 0,001587 C - 0,0000014 C^2 + 0,0000353 PC.$$

$$R^2 = 0,980909$$

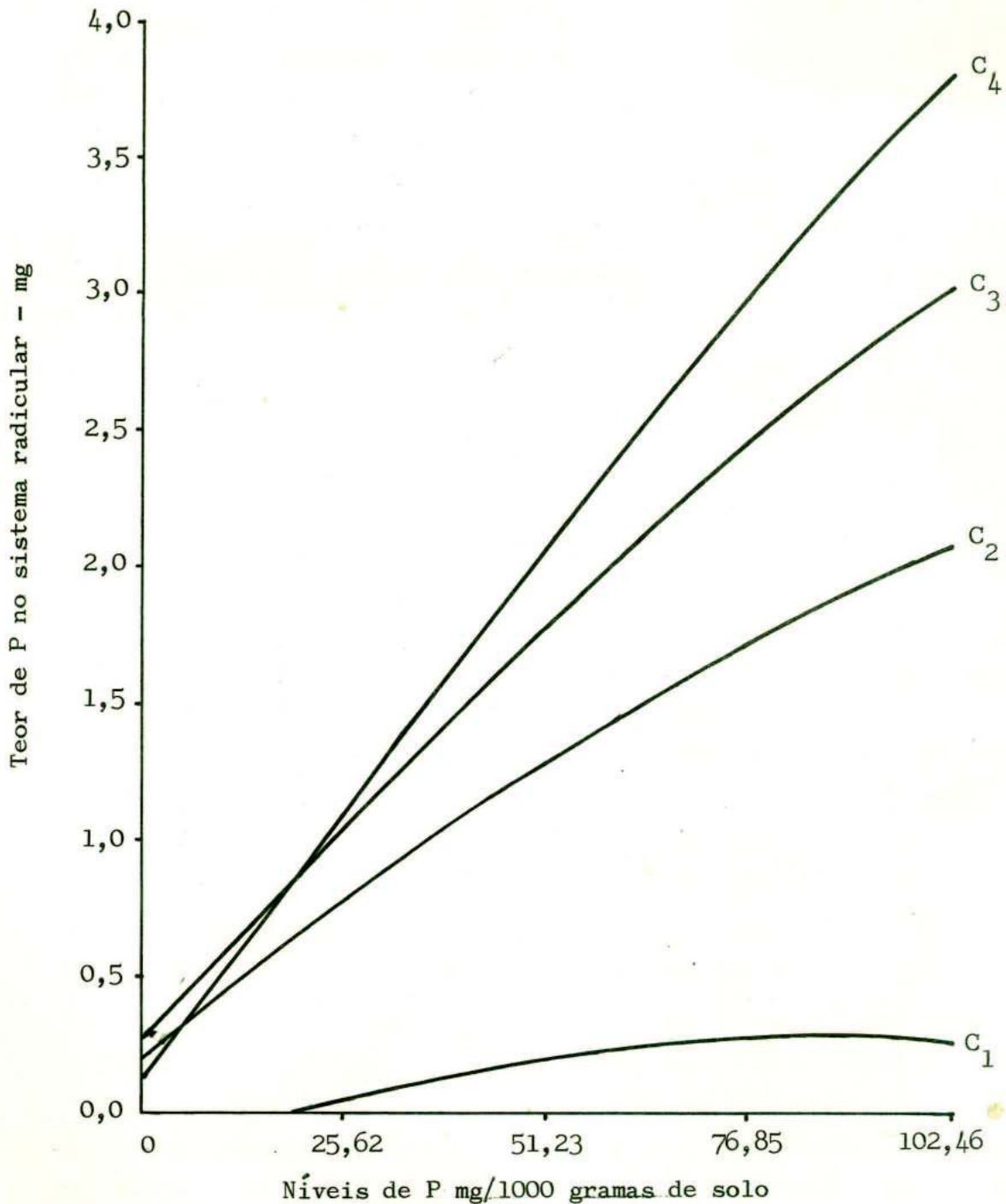


FIGURA 8 - Produção de raízes e o teor de fósforo absorvido em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada. $C_1 = 0,00$; $C_2 = 386,0$; $C_3 = 637,0$ e $C_4 = 889,0$ mg de corretivos/1000 gramas de solo.

bação fosfatada.

Quanto ao pH do solo, após a colheita, Figura 6A, observa-se seu aumento com a calagem. Entretanto, conforme evidenciado anteriormente, não se constata efeitos nas formas de fósforo com esta elevação do pH. Por outro lado, ao se analisar os teores de fósforo encontrados no sistema radicular e na parte aérea, verifica-se o efeito praticamente linear com o aumento da adubação fosfatada em todos os níveis de calagem, sendo os maiores teores encontrados quando se utilizou os níveis máximos de calagem (889,0 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e $\text{Mg}(\text{OH})_2/1000$ gramas de solo. Desta forma, possivelmente a calagem não tenha afetado significativamente a liberação do fósforo no solo (Figuras 7 e 8).

Através do Quadro 1A, observa-se a existência de teores elevados de alumínio trocável ao pH natural do solo. Estas evidências, aliadas às produções praticamente mulas ao pH natural do solo em todos os níveis de adubação fosfatada, levam a inferir o efeito principal da calagem como a eliminação da toxidez produzida pela presença do alumínio trocável.

A ausência dessa toxidez, favorecendo a absorção de Ca, Mg e P, forneceu o aumento das produções do sistema radicular e da parte aérea e da absorção de fósforo, como citado anteriormente.

Diversos trabalhos têm evidenciado que a indução dos sintomas de deficiência de fósforo não é perfeitamente correlacionada com o aumento do fornecimento deste elemento ao meio em que se estuda, mesmo se estes tratamentos restituem os teores de fósforo às plantas (24, 39). O fósforo somente reduz a toxidez do alumínio quando existem condições para sua precipitação na solução do solo. Essa observação é válida, inclusive para os resultados obtidos por COLEMAN et alii (16) quando afirmam que o alumínio trocável é bem mais ativo na sorção de fósforo quando

hidrolisado.

A análise de regressão obtida para a relação entre o fósforo total encontrado na parte aérea e no sistema radicular, Figura 9, permite observar uma maior expressão do fósforo encontrado na parte aérea ao nível do pH do solo. Essa expressão diminui paulatinamente com a adição de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$, até um valor constante próximo de 1,8 em todos os níveis de fósforo, quando com o nível máximo de calagem utilizado (889,0 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2/1000$ gramas de solo).

Estes dados estão em perfeito acordo com os resultados obtidos por FOY e BROWN (24) onde se verifica que o excesso de alumínio trocável limita a absorção e translocação de fósforo. RAGLAND e COLEMAN (62) também evidenciaram uma redução de produção nas raízes de sorgo até que 80% do alumínio trocável fosse neutralizado.

É interessante observar o valor constante próximo a 1,8 na relação P parte aérea/P sistema radicular, em todos os níveis de adubação fosfatada. A tendência desse valor no LR, Figura 18, é de aumentar com a adubação fosfatada. Possivelmente, nesse caso, algum outro elemento tenha se tornado limitante para o pleno desenvolvimento do vegetal. Tal hipótese pode ser reafirmada ao se analisar as representações gráficas das equações entre as produções da parte aérea e das raízes com seus respectivos teores de fósforo, Figuras 10 e 11.

Por intermédio destas equações, verifica-se o perfeito ajustamento na equação do 2º grau aos dados da parte aérea, em todos os níveis de calagem. Ao se analisar os teores máximos de fósforo absorvido, verifica-se que o nível 0 de calagem correspondeu a uma absorção de 1,75 mg de P, equivalente a 102,47 mg de P/1000 gramas de solo. Ao nível de 386,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo, o máximo de absorção de P foi de 4,021 mg, correspondendo a 76,86 mg de P/1000 g de solo. Ao nível de 637,0 mg de cor

QUADRO 15 - Análise de variância para os dados obtidos na produção da parte aérea e do sistema radicular em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no IR.

Fonte de Variação	G.L.	Sistema Radicular <u>1/</u>		Parte Aérea <u>2/</u>	
		Q.M.	F.	Q.M.	F.
Níveis de P	4	1.675.900	50.12 ⁺⁺	3.588.350	137.50 ⁺⁺
Níveis de Cal	3	3.727.320	111.47 ⁺⁺	7.085.680	271.51 ⁺⁺
P x Cal	12	231.203	6.94 ⁺⁺	340.134	13.03 ⁺⁺
Erro	60	33.438,7		26.438,7	

1/ - C.V. 28,32%

2/ - C.V. 16,47%

OBS.: ++ - significativo ao nível de 1%.

$$Y = 1,31011 + 0,03619 P - 0,00223 C + 0,000003 C^2 - 0,000039 PC$$

$$R^2 = 0,890503$$

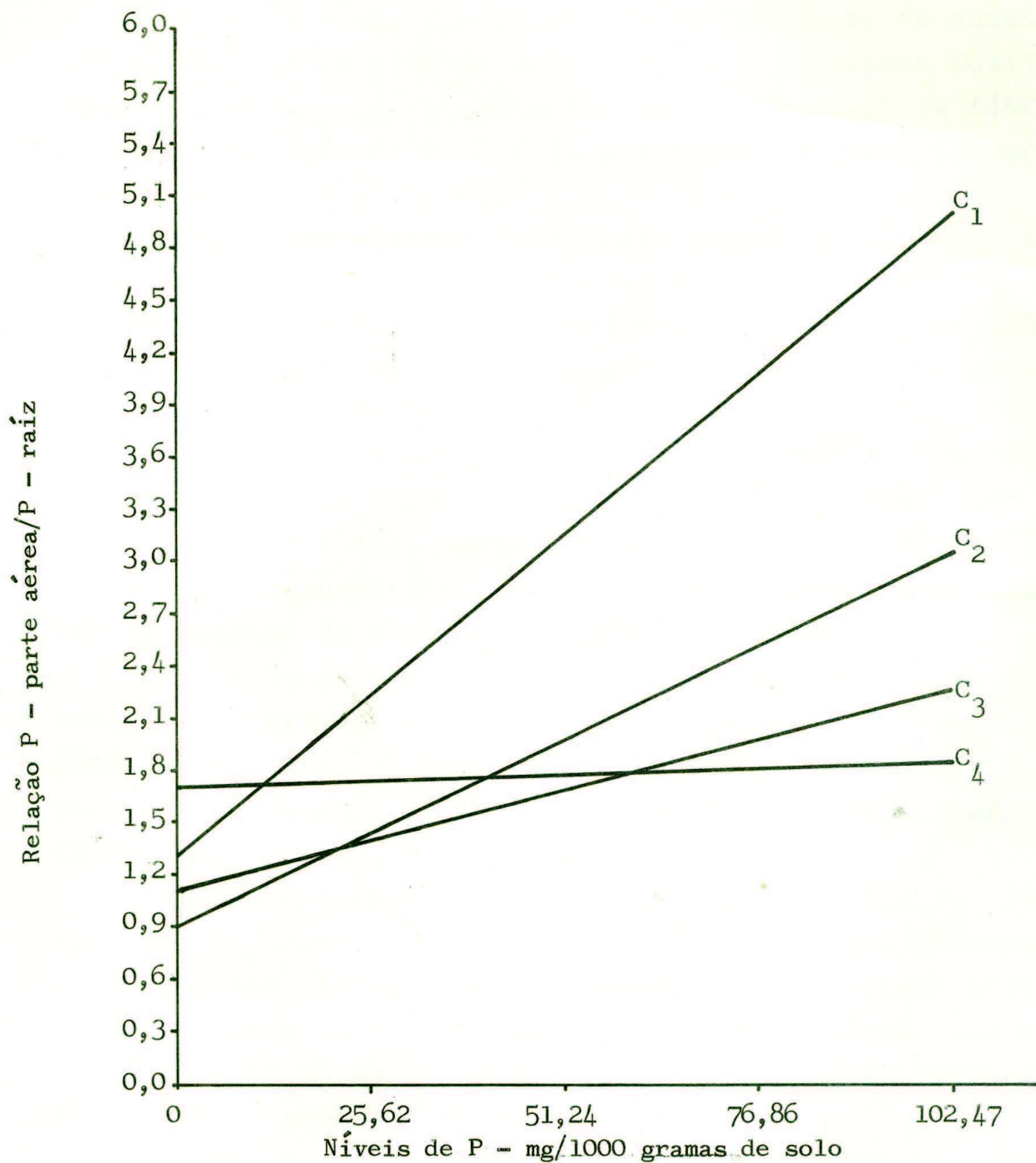


FIGURA 9 - Valores obtidos na relação entre o P da parte aérea e o P do sistema radicular no solo LVE. $C_1 = 0,00$; $C_2 = 386,0$; $C_3 = 637,0$ e $C_4 = 889,0$ mg de corretivo/1000 gramas de solo.

retivo/1000 g de solo, houve um máximo de absorção de 5,50 mg de P, equivalente a 76,86 mg de P/1000 g de solo e, ao nível de 889,0 de corretivo por 1000 gramas de solo, houve um máximo de 5,57 mg de P, correspondendo a 76,86 mg de P/1000 g de solo, Quadro 16. Desta forma, ao se aumentar o nível de Ca + Mg no solo, obtém-se respostas positivas na produção, com conseqüente aumento no teor de fósforo absorvido, máximo em $3/4$ da quantidade necessária para saturar o solo com fósforo.

Quanto ao sistema radicular, apenas ao nível de 386,0 mg de corretivo/1000 g de solo, obteve-se uma absorção máxima de fósforo (1,914 mg) equivalente a 76,88 mg de P/1000 g de solo. As demais equações, tendendo à linearidade, tiveram o máximo extrapolado.

Confrontando estes resultados com aqueles obtidos para as produções da parte aérea e do sistema radicular e da absorção de P como variáveis dependentes dos níveis de adubação e calagem, Figuras 5, 6, 7 e 8, verifica-se haver um consumo de luxo na absorção de fósforo.

Tomando-se como exemplo o nível de 889,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo, na dependência dos níveis de fósforo em adubação, verifica-se efeito praticamente linear na produção da parte aérea e do sistema radicular, com máximo extrapolado, Figuras 5 e 6.

Nas mesmas condições, a quantidade de fósforo absorvido, Figuras 7 e 8, apresenta efeito linear. Todavia, a relação das produções com a quantidade de fósforo absorvido apresenta um teor máximo de P na parte aérea, correspondente a 76,86 mg de P/1000 gramas de solo. No sistema radicular, o efeito é linear.

Desta forma, pode-se verificar um consumo de luxo na absorção de fósforo, reafirmando a deficiência de outro elemento nutritivo - Figura 9. Provavelmente, o Zn esteja limitando, pois, durante o desenvolvimento do ensaio, foi constatado sintomas típicos da deficiência deste mi-

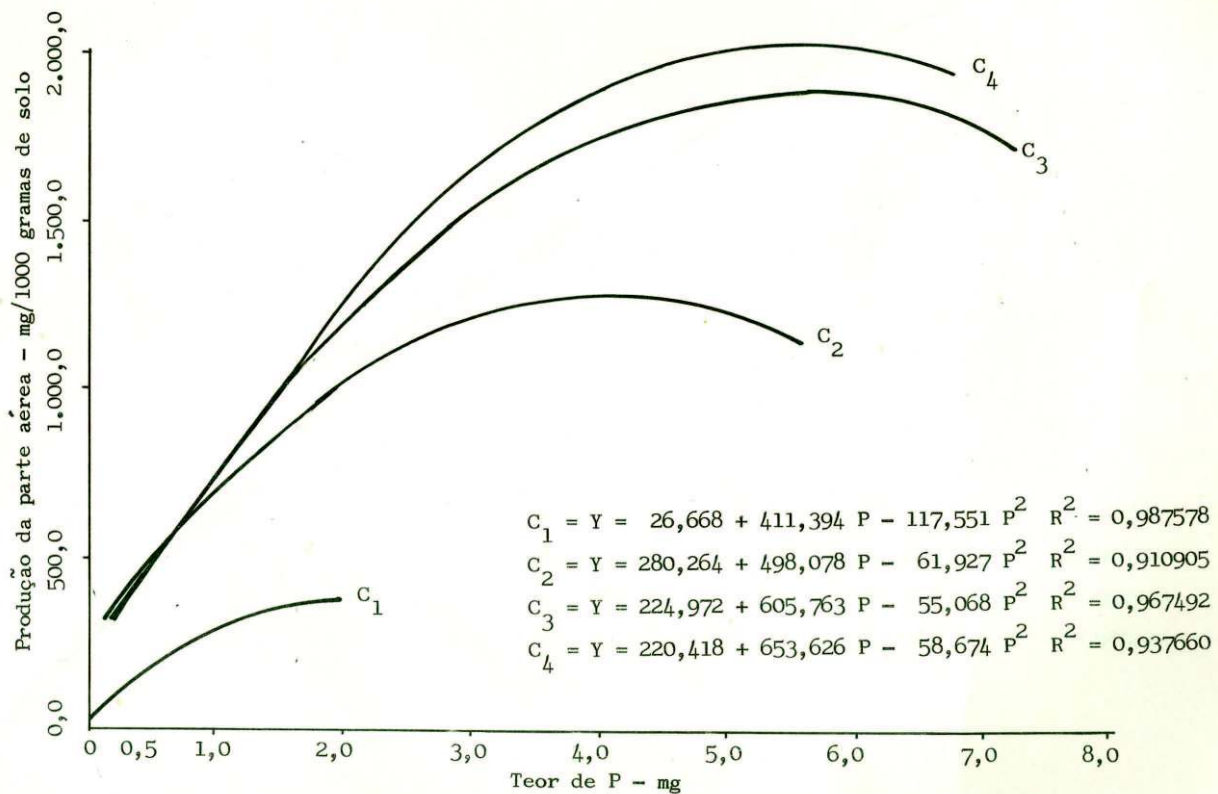


FIGURA 10 - Produção da parte aérea e do teor de P absorvido no LVE. $C_1 = 0,00$; $C_2 = 386,0$; $C_3 = 637,0$ e $C_4 = 889,0$ mg de P/1000 gramas de solo.

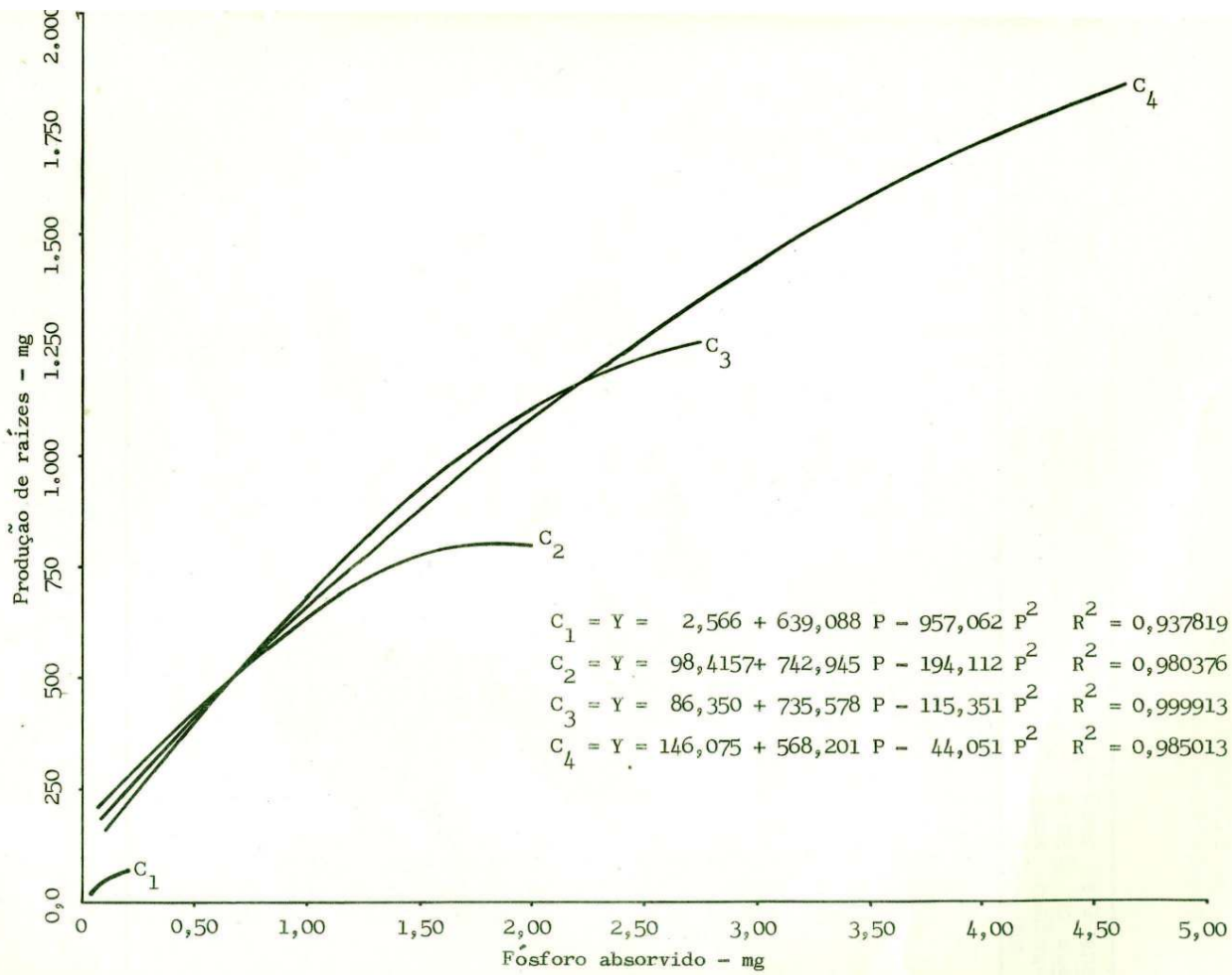


FIGURA 11 - Produção de raízes e do fósforo absorvido em quatro níveis de calagem e cinco de fósforo - LVE - $C_1 = 0,00$; $C_2 = 386,0$; $C_3 = 637,0$ e $C_4 = 889,0$ mg de corretivo no solo

QUADRO 16 - Teores de fósforo total analisado na parte aérea e no sistema radicular do sorgo (Sorghum vulgare, Pers) cultivado no solo LVE em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada⁺/

Nível de calagem mg/1000	Nível de fósforo mg/1000	Teor de P analisado na parte aérea mg	Teor de P analisado no sistema radicular - mg
0,00	0,00	0,055	0,038
	25,82	0,126	0,063
	51,24	0,247	0,101
	76,86	0,679	0,157
	102,47	1,779	0,313
386,00	0,00	0,151	0,104
	25,62	0,876	0,513
	51,24	2,183	1,339
	76,86	4,068	2,027
	102,47	5,533	2,045
637,00	0,00	0,140	0,112
	25,62	1,609	1,005
	51,24	3,203	1,942
	76,86	5,041	2,543
	102,47	7,224	3,087
889,00	0,00	0,166	0,133
	25,62	2,288	1,454
	51,24	4,013	1,954
	76,86	5,557	2,722
	102,47	6,709	3,774

⁺/ Esses resultados foram obtidos pela multiplicação das produções pela % de fósforo analisado e são constituídos pela média de quatro tratamentos.

cro-nutriente.

Atentando para as conclusões obtidas por BURLESON et alii (13) e GANIRON et alii (28), altas concentrações de P nas plantas decrescem a absorção de Zn através de reações bioquímicas nas superfícies absorventes ou no interior de células das raízes. Outrossim, as produções obtidas no LR foram bem superiores, com um teor de fósforo na parte aérea, cerca de 5 vezes mais elevado (Quadros 14, 16, 17, 19).

4.3.3. Nas Produções de Parte Aérea e do Sistema Radicular e Absorção de Fósforo no Latossolo Roxo

As produções da parte aérea e do sistema radicular são apresentadas no Quadro 17; a análise de variância, no Quadro 18. Esta análise de variância constata efeitos altamente significativos para os componentes estudados (níveis de adubação fosfatada, níveis de calagem e para a interação entre fósforo e calagem).

No ajustamento das regressões múltiplas foram tomadas as produções do sistema radicular e da parte aérea e os teores de fósforo analisados em ambas as partes do vegetal como variáveis dependentes dos níveis de calagem e de fósforo.

Os resultados e representações gráficas dos dados de produção da parte aérea e do sistema radicular encontram-se nas Figuras 12 e 13. Verificam-se aumentos consideráveis de produção em função do aumento da calagem. Desta maneira, quando se aumenta a calagem, para o mesmo nível de adubação fosfatada, obtém-se expressivos aumentos na produção. Para o aumento da adubação fosfatada, dentro de um mesmo nível de calagem, as produções tendem a atingir um máximo (variável com o nível de calagem) próximo de 560,76 e 747,64 mg de P/1000 gramas de solo. Quanto maior o nível de corretivo usado, maior é a eficiência da adu-

QUADRO 17 - Produção da parte aérea e do sistema radicular do sorgo (Sorghum vulgare, Pers) em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo.

Calagem mg/1000 g	Fósforo mg de P/1000 g	Produção da parte aérea mg/1000 g	Produção do sis- tema radicular mg/1000 g
	0,00	110,00	142,50
	186,92	1.062,50	582,50
0,00	373,84	1.737,50	977,50
	560,76	2.102,50	1.400,00
	747,67	2.450,00	1.597,50
	0,00	232,50	232,50
	186,92	1.777,50	1.425,00
1.135,00	373,84	2.197,50	1.715,00
	560,76	2.540,00	1.947,50
	747,67	2.615,00	2.040,00
	0,00	262,50	250,00
	186,92	3.125,00	2.190,00
2.425,00	373,84	3.687,50	2.380,00
	560,76	4.627,50	2.307,50
	747,67	4.357,50	2.547,50

bação fosfatada.

Muito embora os teores de alumínio trocável no LR, Quadro 1A, sejam equivalentes aos do LVE, as produções foram significativamente aumentadas com a elevação de adubação fosfatada ao solo em nível de pH natural. Desta forma, os teores de fósforo adicionados apresentaram-se mais efetivos na eliminação da toxidez de alumínio trocável do que no LVE. Sendo os teores de fósforo solúveis em NH_4Cl , NH_4F , NaOH e H_2SO_4 , bem mais expressivos no LR do que no

QUADRO 18 - Análise de variância para os dados obtidos na produção da parte aérea e sistema radicular em quatro níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo.

Fonte de Variação	G.L.	Sistema Radicular ^{1/}		Parte Aérea ^{2/}	
		Q.M.	F	Q.M.	F.
Nível de P	4	6.497.030	423,84 ⁺⁺	17.493.800	302,88 ⁺⁺
Nível de Cal	2	4.958.060	323,45 ⁺⁺	16.317.800	282,52 ⁺⁺
P x Cal	8	337.311	22,00 ⁺⁺	1.000.720	17,33 ⁺⁺
Erro	45	15.328,8		57.758,8	

^{1/} C.V. = 8,54%

^{2/} C.V. = 10,96%

++ - Significativo ao nível de 1%.

$$Y = -153,028 + 7,9828 P - 0,0071039P^2 + 0,381697C + 0,0008956PC$$

$$R^2 = 0,925252$$

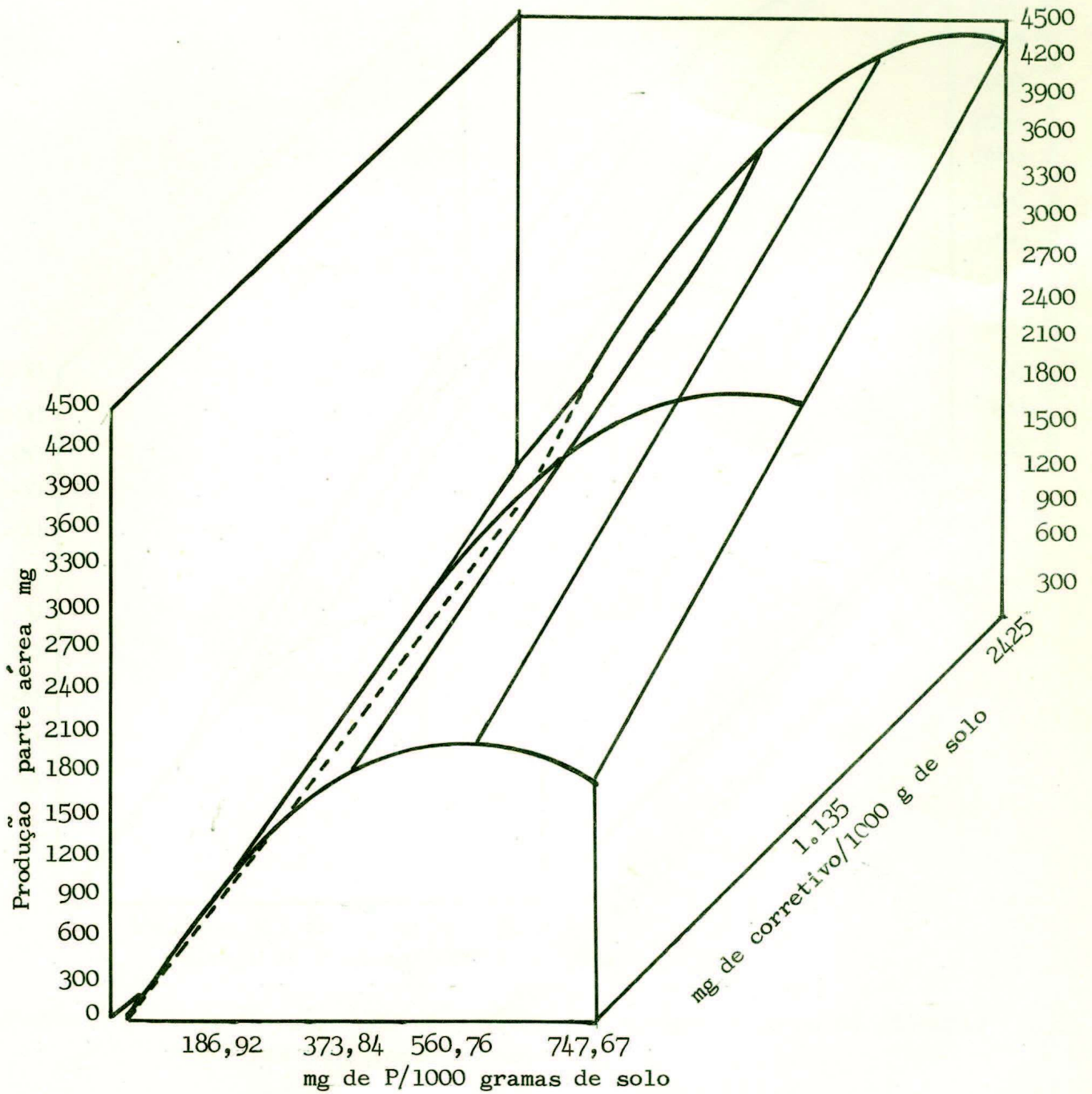


FIGURA 12 - Produção de parte aérea em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo

$$Y = -105,565 + 5,23379P - 0,0043458P^2 + 0,438695C - 0,00004528C^2 + 0,00021778PC$$

$$R^2 = 0,908671$$

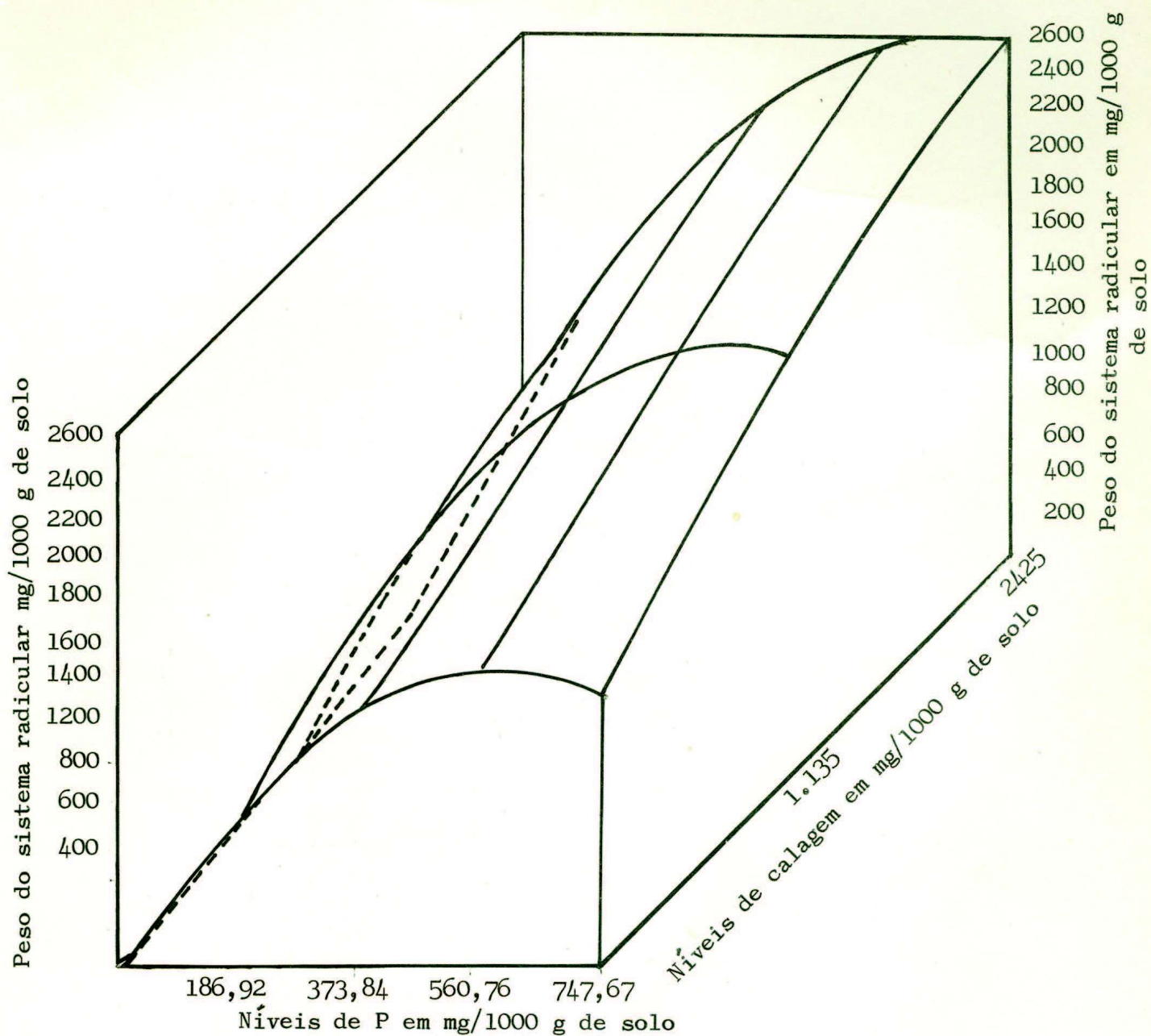


FIGURA 13 - Peso de raízes em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo.

$$Y = - 1,51989 + 0,048769 P - 0,0000341 P^2 + 0,0008039 C + 0,00000777 PC$$

$$R^2 = 0,942162$$

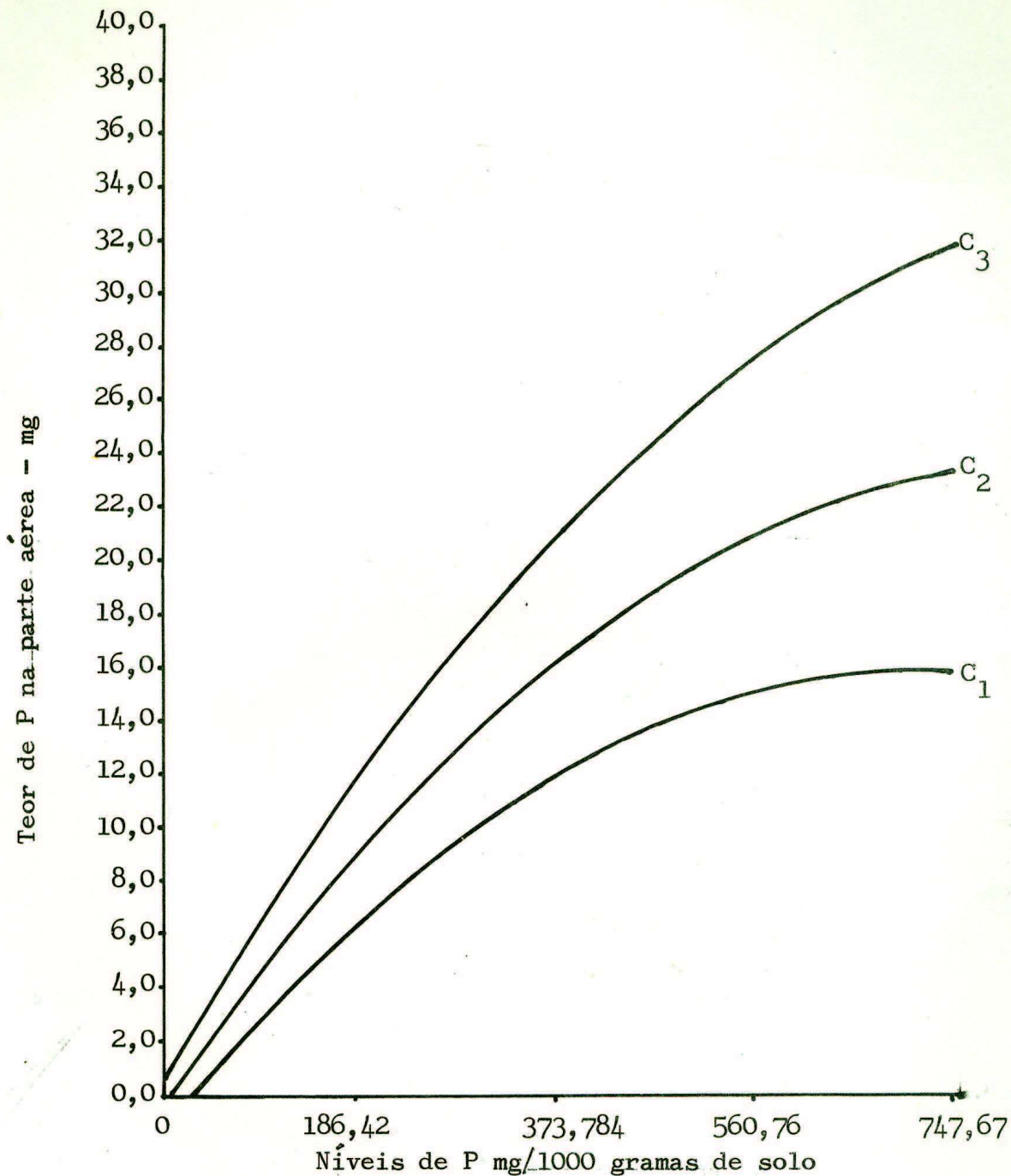


FIGURA 14 - Teor de fósforo encontrado na parte aérea em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfatada no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo.

$$Y = -0,33377 + 0,010804 P - 0,0000065 P^2 + 0,000506 C + 0,00000141 PC$$

$$R^2 = 0,965810$$

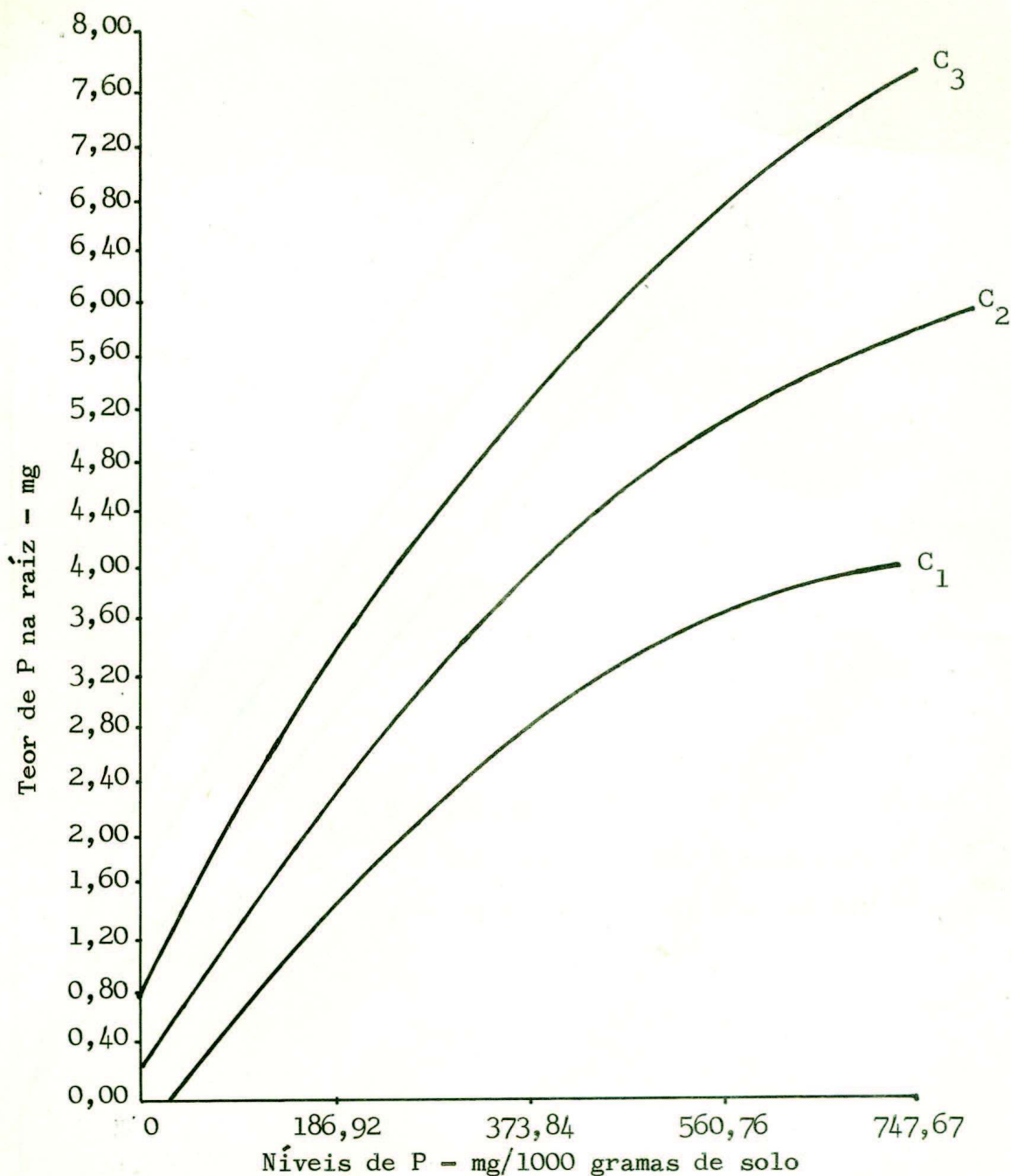


FIGURA 15 - Teor de fósforo encontrado no sistema radicular desenvolvido no Latossolo Roxo. $C_1 = 0,00$; $C_2 = 1.135,00$ e $C_3 = 2.425,00$ mg de corretivo/1.000 gramas de solo.

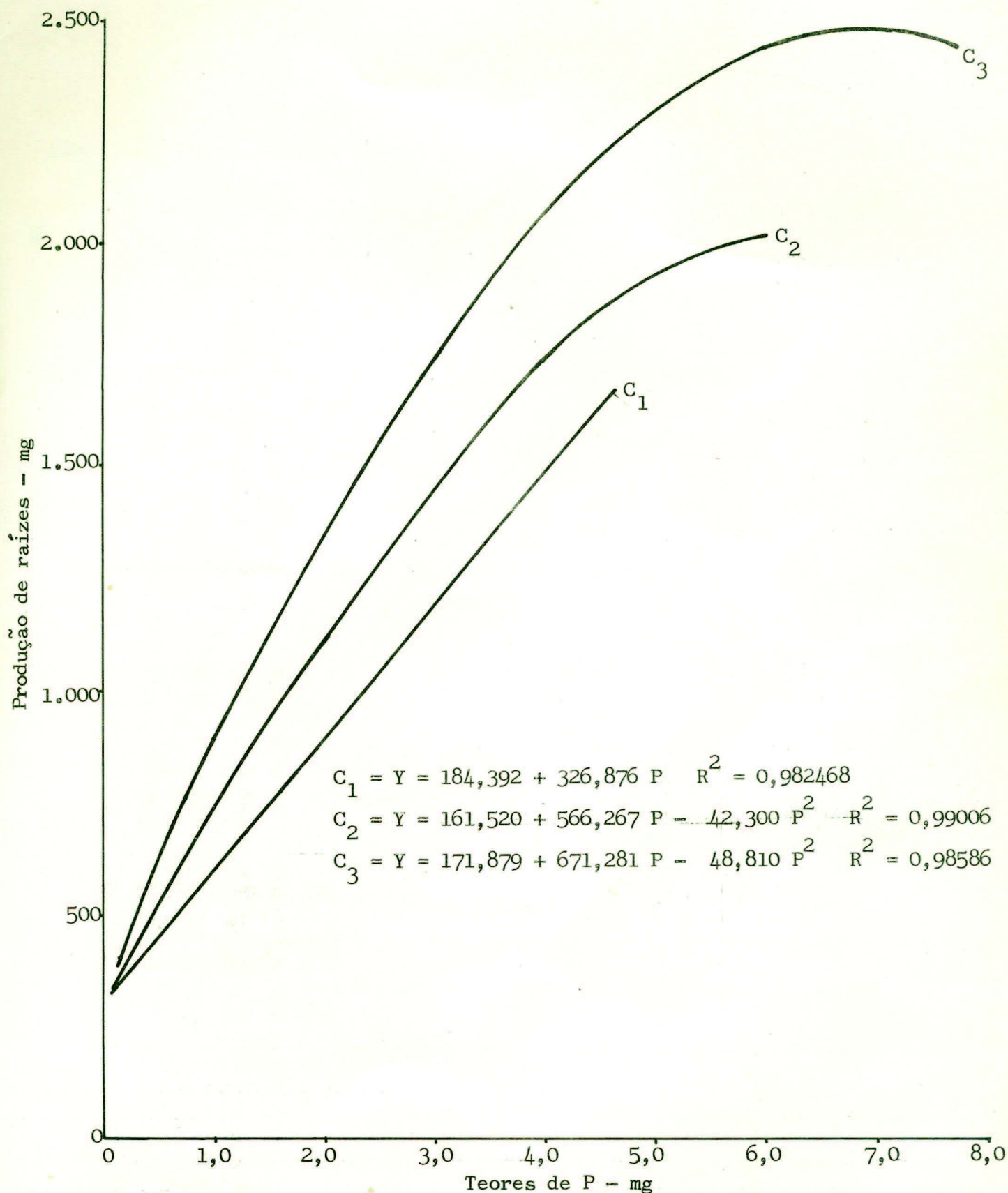


FIGURA 16 - Produção de raízes e seus teores de P em três níveis de calagem e cinco de fósforo no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo.

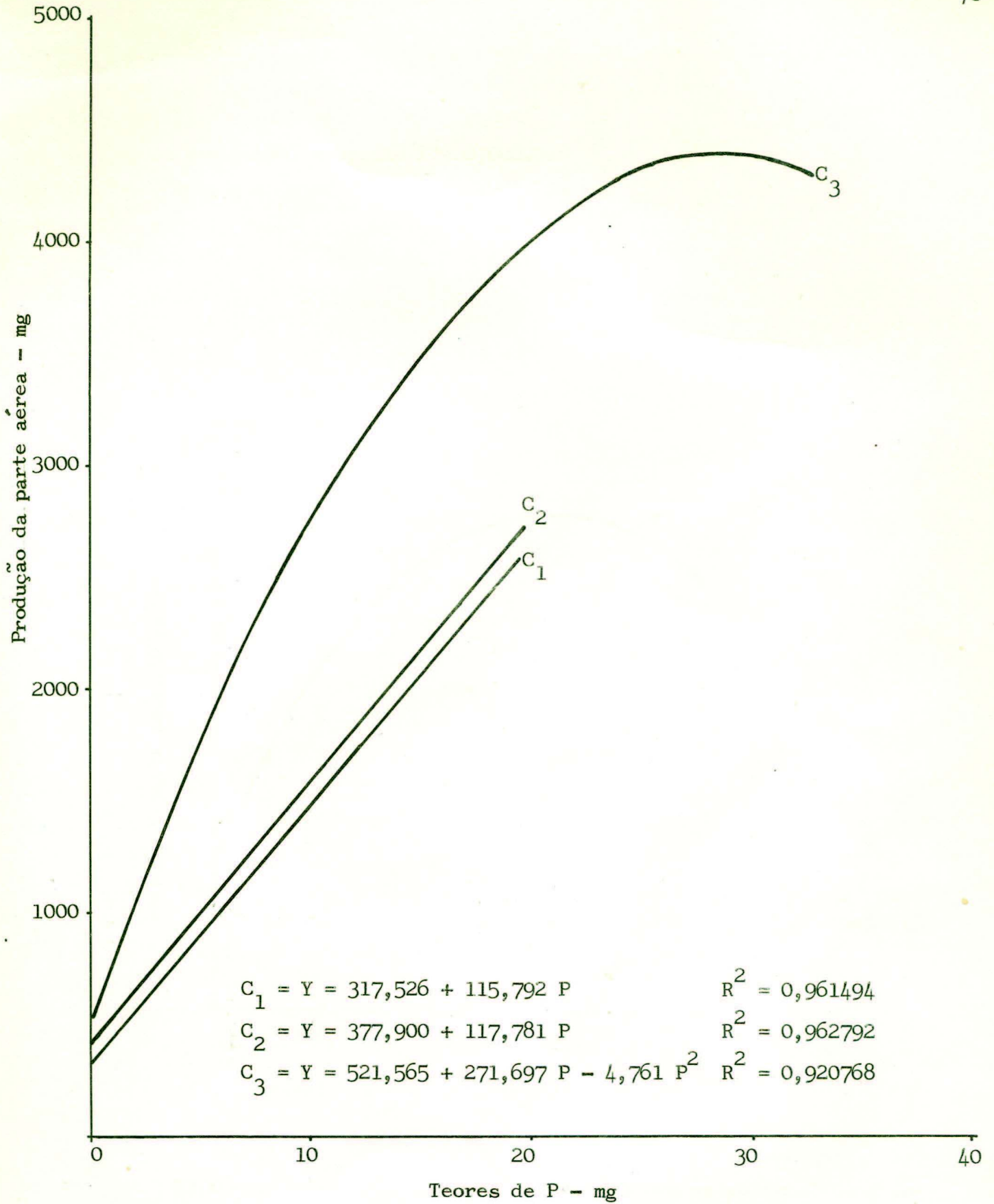


FIGURA 17 - Produção da parte aérea e dos teores de fósforo analisados no Latossolo Roxo. C₁ = 0,00; C₂ = 1.135,0 e C₃ = 2.425,0 mg de corretivo/1000 gramas de solo.

$$Y = 1,4067 + 0,0119 P - 0,0000116 P^2$$
$$R^2 = 0,8192$$

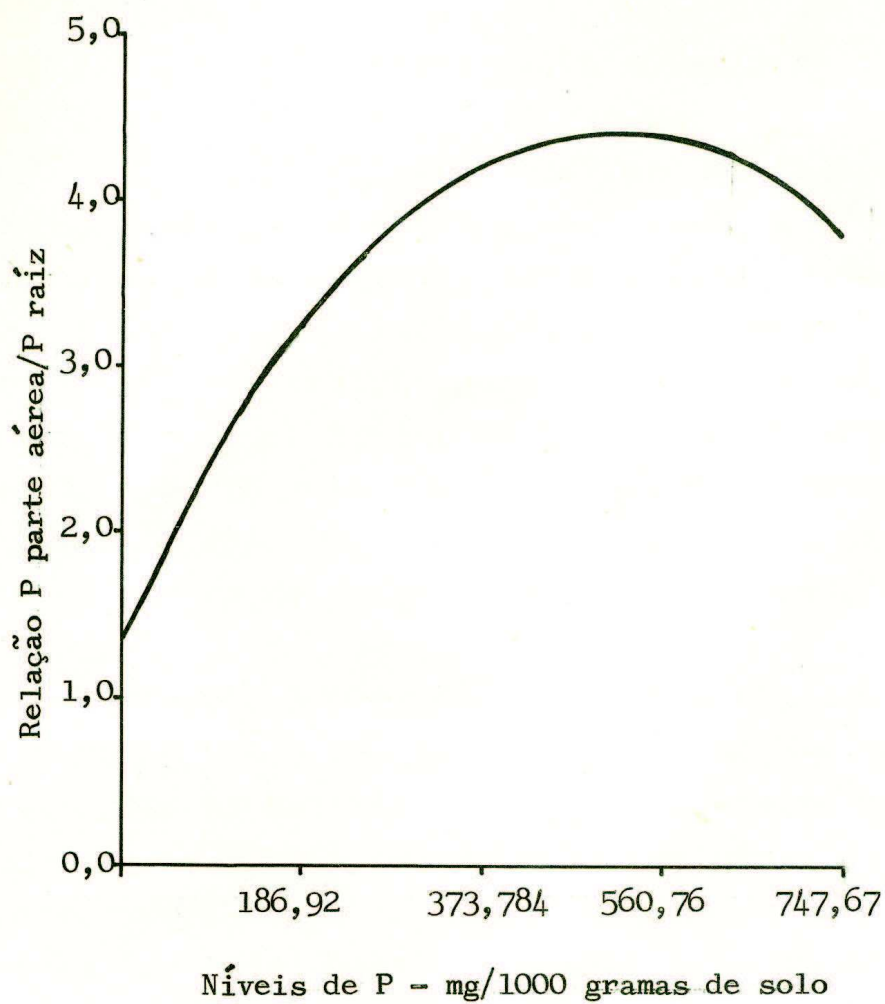


FIGURA 18 - Relação entre o teor de fósforo na parte aérea e no sistema radicular no Latossolo Roxo.

LVE, Quadros 12 e 13, este fato fica, quantitativamente, explicado.

Ao se analisar os teores de fósforo na parte aérea e no sistema radicular, Figuras 14, 15, verifica-se a presença de maiores quantidades de fósforo para os níveis mais elevados de cálcio e magnésio. Tais fatos tanto podem conduzir à eliminação da toxidez de alumínio, indispensável ao melhor aproveitamento de adubação fosfatada, como também ao fornecimento de elementos limitantes.

Contudo, os teores de alumínio trocável extraído com KCl 1 N são consideráveis no solo em pH natural, Quadro 1A.

O efeito linear, observado na Figura 17, entre a produção da parte aérea e os teores de fósforo analisados nessa parte do vegetal, desenvolvido no solo em pH natural e ao nível de 1.135,00 mg de corretivo/1000 gramas de solo, só pode indicar o mau aproveitamento da adubação fosfatada, principalmente quando se observa que, ao nível de Ca + Mg no solo (2.425,0 mg/1000 gramas de solo), o máximo de absorção de fósforo (28,53 mg de P) é obtido ao nível de 3/4 da sorção máxima do LR (560,76 mg de P/1000 de solo), Quadro 19.

Quanto à produção de raízes e o seu teor de fósforo, verifica-se que as maiores absorções de fósforo correspondem às maiores produções. O efeito linear é obtido somente ao pH natural do solo. Ao nível de 1.135 mg de corretivo/1000 gramas de solo, apesar de ter-se encontrado melhor ajustamento para a equação do 2º grau, o máximo de absorção fica extrapolado. Já ao nível de 2.425 mg de corretivo/1000 g, o máximo de fósforo analisado, 6,876 mg de P, corresponde aproximadamente à adubação de 560,76 mg de P/1000 g de solo (3/4 da sorção máxima).

Verifica-se, portanto, aumentos consideráveis tanto das produções como da absorção de fósforo com o fornecimento de cálcio e magnésio até um máximo de 560,76 mg de

QUADRO 19 - Teores de fósforo total analisados na parte aérea e no sistema radicular do sorgo (Sorghum vulgare, Pers) cultivados no solo LR em três níveis de calagem e cinco de adubação fosfata da⁺

Nível de calagem mg/1000 g	Nível de fósforo mg/1000 g	Teor de P analisado na parte aérea mg	Teor de P analisado no sistema radicular - mg
0,00	0,00	0,170	0,110
	186,92	4,473	1,078
	373,84	11,380	2,297
	560,76	15,138	3,472
	747,67	19,575	4,601
1.135,00	0,00	0,198	0,135
	186,92	9,190	2,750
	373,84	15,492	4,373
	560,76	18,694	4,538
	747,67	19,874	5,977
2.425,00	0,00	0,184	0,147
	186,92	8,500	4,030
	373,84	23,932	5,617
	560,76	32,624	6,576
	747,67	30,110	7,744

+/ Resultados obtidos através da multiplicação das produções pela % de fósforo analisado. Constituem média de quatro observações.

P/1000 g de solo.

Diversos pesquisadores, citados nos trabalhos apresentados por FOY e BROWN (24), têm encontrado sintomas evidentes da toxidez de alumínio reduzindo a absorção de

P e Ca tanto na parte aérea como no sistema radicular, sendo tal redução maior na parte aérea.

Analisando a Figura 18, relação entre o fósforo analisado na parte aérea e no sistema radicular, verifica-se a concordância com as observações apresentadas pelos autores. A níveis mais baixos de adubação fosfatada, esta relação é menor, indicando maiores teores no sistema radicular. Por intermédio desta relação também se verifica que apenas a adubação fosfatada é suficiente para induzir o aumento das absorções de fósforo. A calagem, manifestando seu efeito de maneira análoga, tanto no sistema radicular como na parte aérea, não apresenta significância na relação entre o P analisado na parte aérea e no sistema radicular. Desta forma, a presença de cálcio e magnésio no sistema solo LR x planta, tem como efeito principal o fornecimento de cálcio e magnésio como elementos limitantes, favorecendo o desenvolvimento vegetal e a eficiência da adubação fosfatada.

5. CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente trabalho foi realizado, as seguintes principais conclusões podem ser tiradas:

- 5.1. A composição mineralógica das argilas nos solos estudados, (Latossolo Vermelho Escuro, textura média e Latossolo Roxo), é constituída, predominantemente, de caolinita e gibsitita;
- 5.2. Os maiores valores de sorção máxima foram obtidos ao pH natural do solo. Estas sorções, respectivamente para o LVE e LR, foram correspondentes a 0,10246 e 0,74769 mg de P/grama de solo;
- 5.3. O pH inicial das soluções com concentrações crescentes de P decresceu ao reagir com os solos. Este decréscimo foi mais acentuado no LR com maiores teores de superfícies adsorventes;
- 5.4. No Latossolo Roxo, a sorção máxima decresce com o aumento do pH inicial da suspensão; no Latossolo Vermelho Escuro, decresce até o pH inicial de 6,5; ao pH inicial, igual a 7,0,

volta a aumentar, sugerindo condições favoráveis à hidrólise do alumínio trocável com conseqüente aumento da efetividade deste cation na sorção;

5.5. O Latossolo Vermelho Escuro, desde a concentração de 5 ppm, apresenta reversibilidade crescente tanto em função da concentração como do pH. A partir de 60 ppm, ao pH natural do solo, aumentando-se a concentração de fósforo, observou-se reação de dissolução com de créscimo do fósforo sorvido. Nas demais variações do pH, após esta concentração, a sorção de fósforo por unidade de solo, permaneceu constante.

5.6. Nas isotermas de sorção, os limites para as três regiões dependem não só da natureza dos adsorventes como dos seus teores e do equilíbrio dinâmico entre êles;

5.7. As dessorções, tanto no LR como no LVE, decresceram nas sucessivas extrações. Todavia, ao se analisar os resultados das dessorções de fósforo em função do pH, verifica-se comportamentos totalmente distintos entre solos e entre dessorções. Essa variabilidade deve estar ligada aos adsorventes e às regiões de sorção.

No Latossolo Roxo, a primeira dessorção foi mais efetiva (em concentrações acima de 30 ppm) ao pH 6,5; a 2.^a dessorção, ao pH 7,0 e, na 3.^a, já se nota tendências à estabilidade em função do pH;

No Latossolo Vermelho Escuro, os resultados das três dessorções indicam haver um maior teor de fósforo dessorvido ao pH 6,5 na primei-

ra dessorção; ao pH 6,0, na 2ª dessorção e, na 3ª, análogo ao LR, uma estabilidade com relação do pH;

- 5.8. Não se constatou efeito de calagem sobre as formas de fósforo solúvel em NH_4Cl , NH_4F , NaOH e H_2SO_4 ;
- 5.9. Nos dois solos, ao se aumentar o nível de cálcio e magnésio, as produções do sistema radicular e da parte aérea e a absorção de fósforo aumentaram consideravelmente em todos os níveis de fósforo, partindo de uma produção praticamente nula ao pH natural do solo;
- 5.10. De maneira geral, as produções e os teores de fósforo, absorvido pelas plantas em ambos os solos, tiveram um máximo quando em se utilizando o nível de 0,75 vezes a sorção máxima (76,86 e 560,70 mg de P/1000 gramas de solo para o LVE e LR, respectivamente) ao nível máximo de calagem-869,00 mg de $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$ /1000 gramas de solo no LVE e 2.425,00 mg no LR.
- Estas observações, aliadas às demais, indicam a possibilidade de se trabalhar a adubação fosfatada através de níveis da saturação máxima de fósforo pelo solo e ou a fosfatagem imediata, alicerçadas em estudos nutricionais.
- 5.11. Apenas no LVE foi verificado um consumo de luxo em fósforo pelas plantas;
- 5.12. Como conclusão geral, pode-se evidenciar que a toxidez de alumínio trocável e retenção de P pelo solo são fatores importantes e independentes na limitação da produtividade. O fósforo adicionado em concentrações elevadas, sendo efetivo na eliminação da toxidez

de alumínio no LR e não o sendo no LVE indica que cada solo necessita de estudos que caracterizem suas reações, favorecendo quantificar qualificar o melhor equilíbrio entre os diversos nutrientes envolvidos na produção máxima.

6. RESUMO

De maneira geral, os solos de clima tropical apresentam baixos teores de fósforo "assimilável" pelas plantas, baixo pH, níveis deficientes de cálcio e magnésio, etc., impedindo o desenvolvimento adequado das culturas.

O objetivo deste trabalho é estudar, em dois Latos solos de Mato Grosso, a influência de cinco níveis de saturação de fósforo calculados pela isoterma de Langmuir, em presença de níveis de calagem, procurando equacionar alguns problemas inerentes ao emprego dessas práticas agrícolas, tanto nas reações entre o solo e o fósforo como na produção vegetal.

No estudo da sorção máxima, através da equação de Langmuir, verificaram-se influências do pH inicial da suspensão na metodologia de determinação, demonstrando reações distintas no LVE e LR. No LR, a sorção máxima decresce com o aumento do pH inicial da suspensão; no LVE, decresce até o pH inicial 6,5, voltando a aumentar no pH 7,0.

Os maiores valores de sorção máxima foram obtidos ao pH natural do solo sendo, respectivamente para o LVE e LR, 0,10246 e 0,74769 mg de P/grama de solo. Estes valores, fracionados em quatro níveis, forneceram a indicação

quantitativa para o estudo da adubação fosfatada em presença de níveis de calagem, quatro níveis para o LVE e três para o LR), na nutrição do sorgo, Sorghum vulgare, Pers.

Na análise das produções de sorgo, verificou-se que as produções e os teores de fósforo absorvidos pelas plantas, (em ambos os solos), tiveram um máximo quando se utilizou o nível de 0,75 vezes a sorção máxima, (76,86 e 560,70 mg de P/100 gramas de solos, LVE e LR, respectivamente), ao nível máximo de calagem, (889,0 mg e 2.425,0 mg de corretivo, LVE e LR respectivamente).

Estas observações favorecem a inferência de se trabalhar a adubação fosfatada em níveis da capacidade de saturação máxima de fósforo pelo solo e/ou fosfatagem imediata, alicerçadas em estudos de equilíbrio nutricional.

O fósforo, adicionado em concentrações elevadas, foi efetivo na eliminação da toxidez de alumínio trocável no LR; no LVE, não se constatou este efeito. Desta forma, pode-se concluir que cada solo necessita de estudos que caracterizem suas reações, favorecendo quantificar e qualificar o equilíbrio entre os diversos nutrientes envolvidos na produção máxima.

7. LITERATURA CITADA

1. ADRIANO, D.C., PAULSEN, G.M. & MURPHY, L.S. Phosphorus - iron and phosphorus zinc relationships in corn (Zea mays, L.) seedlings as affected by mineral nutrition. Agron. J. Madson, 63 (1): 36-9. 1971.
2. AHENKORAH, Y. Phosphorus-retention capacities of some cocoa-growing soils of Ghana and their relationship with soil properties. Soil Science, Baltimore, 105 (1): 24-30. 1968.
3. ANDRADE, S.S. Gênese e classificação de solos de três catenas nos municípios de Piracicaba e Rio Claro. Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz" da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre, 1971. 74 p.
4. BACHE, B.W. Aluminum and iron phosphate studies related to soils. 2-Reaction between phosphate and hydrous oxides. J. Soil Sci. Oxford, 15 (1): 110 - 6 1964.
5. BACHE, B.W. & WILLIAMS, E.G. A phosphate sorption index for soils. J. Soil Sci. Oxford, 22 (3): 289 - 301. 1971.
6. BLACK, C.A. Soil Acidity. In BLACK, C.A. Soil plant re-

- relationships, 2^a ed. New York, John Wiley Sons, Inc. 1968, cap. 5.273-355.
7. BLACK, C.A. Phosphorus. In BLACK, C.A. Soil plant relationships, 2^a ed. New York, John Wiley Sons, Inc. 1968, cap. 8,558-653.
8. BRAGA, J.M. Adaptação do método de fracionamento a trabalhos de rotina. Trabalho apresentado na 8^a Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo. 1972.
9. _____ & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e folhas.(em publicação). Viçosa. MG.
10. _____. Relação entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado. 1. Trabalhos de laboratório. Rev. Ceres, Viçosa, 19 (102): 124-36. 1972.
11. BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. Soil Science, Baltimore, 93 (1): 39-49. 1962.
12. BUCKMAN, H.O. & BRADY, N.C. The nature and properties of soils. 4^a ed. New York. The MacMillan Company. 1943. 499 p.
13. BURLESON. C.A., DACUS, A.D. & GERARD, C.J. The effect of phosphorus fertilization on the zinc nutrition of several irrigated crops. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 25 (5): 365-8. 1961.
14. CATANI, R.A. A fixação do fósforo por alguns solos do Brasil e a adubação fosforada. Rev. Agrônômica, Lisboa, 52 (1/2): 83-7, 1969.
15. CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science, Baltimore, 84 (2): 133 - 44. 1957.
16. COLEMAN, N.T., THORUP, J.T. & JACKSON, W.A. Phosphate adsorption reactions that involve exchangeable Al. Soil Science, Baltimore, 90 (1): 1-7. 1960.

17. De DATTA, S.K., FOX, R.L. & SHERMAN, G.D. Availability of fertilizer phosphorus in three latosols of Hawaii. Agron. J. Madison, 55 (4): 311-3, 1963.
18. FASSBENDER, H.W. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evolución usando la isoterma de Langmuir Fitotecnia Latino Americana, Costa Rica, 3 (1/2): 203-16, 1966.
19. _____ . Phosphorus fixation in tropical soils. Agri Digest, Bruxelles, (18): 20-7, 1969.
20. _____ . Retención y transformación de fosfatos en 8 Latosoles de la Amazonia del Brasil. Fitotecnia Latino Americana, Costa Rica, 6 (1): 1 - 9, 1969.
21. _____ ., MULLER, L. & BALERDI, F. Estudio del fósforo en suelos de America Central. 2- Formas y su relation con las plantas. Turrialba, Costa Rica, 18 (4): 333-347, 1968.
22. FERNANDES, B. & SYKES, D.J. Capacidade de campo e a retenção de água em três solos de Minas Gerais, Ceres, Viçosa, 15 (83): 1-39, 1968.
23. FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements os soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 34 (6): 902-6, 1970.
24. FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils. 1. Characterization of aluminum toxicity in cotton. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madson, 27 (4): 403 - 7, 1963.
25. _____ . Toxic factors in acid soils. 2. Differential aluminum tolerance of plant species. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 28 (1): 27 - 32, 1964.
26. FRANKLIN, W.T. & REINSENAUER, H.M. Chemical characteristics of soils related to phosphorus fixation and availability. Soil Science, Baltimore, 90 (3): 192-200, 1960.

27. FRIED, M. & SHAPIRO, R.E. Phosphate supply pattern of various soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 20 (4): 471-5. 1956.
28. GANIRON, R.B., ADRIANO, D.C., PAULSEN, G.M. & MURPHY, L.S. Effect of phosphorus carriers and zinc sources on phosphorus-zinc interaction in corn. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 33 (2): 306-9, 196.
29. GUNARY, D. A new adsorption isotherm for phosphate in soil. J. Soil Sci. Oxford, 21 (1): 72-7, 1970.
30. HALL, J.K. & BAKER, D.E. Phosphorus fixation by montmorillonite and vermiculite clays as influenced by pH and soluble aluminum. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 35 (6): 876-81, 1971.
31. HEMWALL, J.B. The fixation of phosphorus by soils. Adv. in. Agronomy, New York, 9: 95-112, 1957.
32. _____. The role of soil clay minerals in phosphorus fixation Soil Science, Baltimore, 83 (2):101-8, 1957.
33. HSU, P.H. Adsorption of phosphate by aluminium and iron in soils Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 28 (4): 474-8, 1964.
34. _____. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acidic soils. Soil Science, Baltimore, 99 (6): 398-402, 1965.
35. IBM - International Business Machines Corporation. 1130, Statistical System (1130-CA-06X). User's Manual. 2^a ed. New York, 1967. 118 p.
36. JACKSON, M.L. Soil Chemical analysis advanced course. Madison. Publicado pelo Autor. Depart. Of. Soil Science, University of Wisconsin, 1956. 894 p.
37. _____. Soil Chemical analysis. 5 th. ed. Englewood, Prentice Hall, Inc. 1965. 498 p.
38. _____. & SHERMAN, C.D. Chemical weathering of mineral in soils. Adv. Agron. New York, 5: 219-318. 1953.

39. KAMPRATH, E.J. & FOY, C.D. Lime fertilizer plant interaction in acid soils. In: OLSON, R.A. et alii. Fertilizer Technology & User. 2th ed. Madson, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. p. 105-51.
40. KANWAR, J.S. Phosphate retention in some Australian soils. Soil Science, Baltimore, 82 (1): 43-50, 1956.
41. KARIN, A. & KHAN, D.H. Relationship between pH and different forms of phosphorus in some soils of East Pakistan. Soil Science, Baltimore, 80 (3): 229-33. 1955.
42. KITTRICK, J.A. & JACKSON, M.L. Electron microscope observation of the reaction of phosphate with minerals, leading to a unified theory of phosphate fixation in soils. J. Soil Sci. Oxford, 7 (1): 81 - 9, 1956.
43. _____ . Rate of phosphate reaction with soil minerals and electron microscope observations on the reaction mechanism. Soil Sci. Amer. Proc. Madison, 19 (3): 292-5, 1955.
44. _____ . & HOPE, E.W. A procedure for the article size separation of soils for X-ray diffraction analysis. Soil Science Baltimore, 96 (5): 319 - 25, 1963.
45. KNOX, E.G. Critérios para clasificación de suelos según la setima approximation en las tres categorías superiores. In: P. MALDONADO, F. La adaptación al castellano de los nombres usados en la 7^a aproximación. Inst. Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba, 1971. 43 p.
46. LARSEN, S. Soil Phosphorus. Adv. in Agronomy, Academic Press, New York, 19: 151-211, 1967.
47. LEAL, J.R. Adsorção de fosfato em latossolos sob cerrado. Rio de Janeiro, 1971. 96 p. (Tese de M.S.).
48. LOTT, W.L., GALLO, J.R. & MEDCALF, J.C. A técnica de análise foliar aplicada ao cafeeiro. Instituto Agro

- nômico de Campinas. Boletim n.º 19. 1956. 29 p.
49. LOW, P.E. & BLACK, C.A. Reaction of phosphate with kaolinite, Soil Science, Baltimore, 70 (4): 273-90, 1950.
50. MAHTAB, S.K., GODFREY, C.L., SWOBODA, A.R. & THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils. 2. The effect on phosphorus uptake by plants. Soil Sci. Amer. Proc. Madison, 36 (1): 55-7, 1972.
51. McKEAGUE, J.A., BRYDON, J.E., MILLES, N.M. Differentiation of forms of extractable iron and aluminum in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madson, 35 (1): 33-8, 1971.
52. MONIZ, A.C. Quantitative minerological analysis of Brazilian soils derived from basic rocks and slate. Unpublished M.S. Thesis, Soil Department University of Wisconsin, Madson, 1967.
53. MOORE, W.J. A isoterma de adsorção de Langmuir. In: MOORE, W.S. Físico-Química. Trad. CESAR, H.L. & ZAMIT, A.A.L. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S.A. & Ed. da Universidade de São Paulo, 1968, 358-60.
54. MULJADI, D., POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. 1. The isotherms and the effect of pH an adsorption. J. Soil Sci. Oxford, 17 (2): 212-29, 1966.
55. _____ . The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. 2. The location of adsorption sites. J. Soil Sci. Oxford, 17 (2): 230-7. 1966.
56. _____ . The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. 3. The effect of temperature on adsorption. J. Soil Sci. Oxford, 17 (2): 238-47, 1966.
57. 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. Madison, 21 144-9, 1967.
58. OLSEN, S.R., KEMPER, W.D. & JACKSON, R.D. Phosphate diffusion to plant roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 26 (3): 222-7, 1962.
59. PEARSON, R. Liming and fertilizer efficiency. Agron. J. Madson, 50 (7): 356-62, 1958.
60. PHILLIPS, A.B. & WEBB, J.R. Production, marketing and use of phosphorus fertilizers. In: OLSON, R.A. et alii. Fertilizer technology & use. Soil Sci. Soc. Amer. Inc. Wisconsin, 2nd ed. 1971, 271-301.
61. RAGLAND, J.L. & SEAY, W.A. The effects of exchangeable calcium on the retention and fixation of phosphorus by clay fraction of soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madson, 21 261-4, 1957.
62. RAGLAND, J.L. & COLEMAN, N.T. The effect of soil solution aluminum and calcium on root growth. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 23 (5): 355-57, 1964.
63. RAMULU, U.S., PRATT, P.F. & PAGE, A.L. Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineral composition. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 31 (2): 193-6, 1967.
64. ROBERTSON, W.K., NELLER, J.K. & BARTLETT, F.D. Effect of lime on availability of phosphorus in soils of high and low sesquioxide content. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 18 (2): 184-6, 1954.
65. ROEDER, M. & BORNEMISZA, E. Algunas propiedades de suelos de la región amazónica del Estado de Maranhão, Brasil. Turrialba, Costa Rica, 18 (1): 39-44, 1968.
66. SÁ JR. J, P.M., GOMES, I.F. & VASCONCELLOS, A.L. Retenção de fósforo em solos da Zona da Mata de Pernambuco. Pesq. Agrop. Bras. Rio de Janeiro, 3: 183-8, 1968.
67. SHUKLA, S.S., SYERS, J.K., WILLIAMS, J.D.H., ARMSTRONG, D.E. & HARRIS, R.F. Sorption of inorganic

- phosphate by lake sediments. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 35 (2): 244-9, 1971.
68. SNEDECOR, G.W. Statistical methods. Iowa State College Press, 4 th. ed. 1955, 485 p.
69. SYERS, J.L., EVANS, T.D., WILLIAMS, J.D.H. & MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brasil. Soil Science, Baltimore, 112 (4): 267-75, 1971.
70. VETTORI, L. Métodos de análise do solo. Boletim Técnico n.º 7. EPFS. EPE. MA. 14.15. 1969.
71. WAUGH, D.L. & FITTS, J.W. Estudos para interpretação de solo: de laboratório e em vasos. Boletim Técnico n.º 7. International Soil Testing.
72. WEIR, C.C. Phosphate studies on the Jamaican bauxite soils. Tropical Agricultura, England, 49 (1):89-96, 1972.
73. WILD, A. The retention of phosphate by soil. J. Soil Sci. Oxford, 1 (2): 221-380, 1950.
74. WOODRUFF, J.R. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relation ship to phosphorus availability Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Madison, 29 (1): 148.50. 1965.

8. APÉNDICE

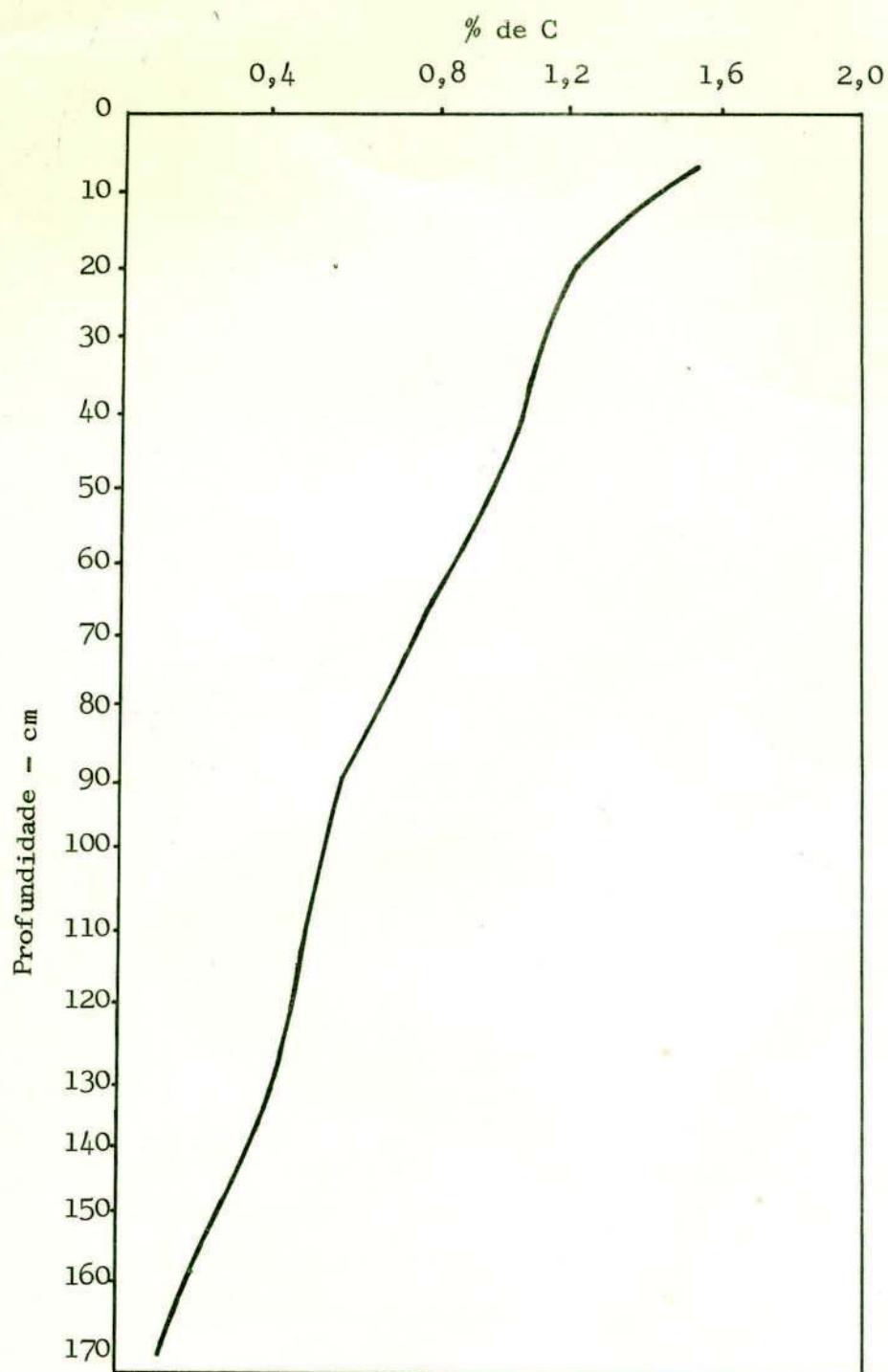


FIGURA 1A - Representação gráfica do teor de C com a profundidade no Latossolo Roxo distrófico.

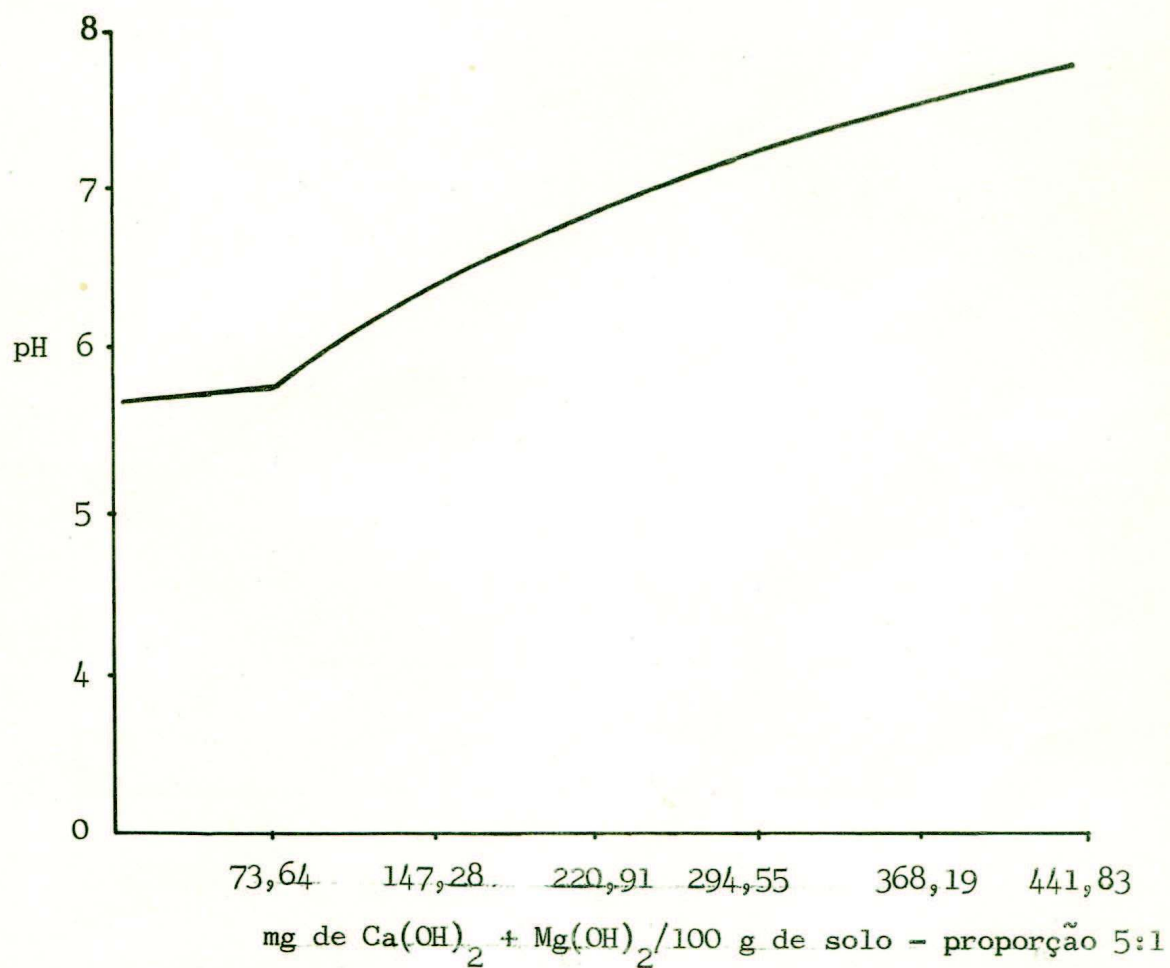


FIGURA 2A - Relação entre o pH e o aumento da quantidade de calagem, calculado pela acidez trocável, para o solo Latossolo Roxo.

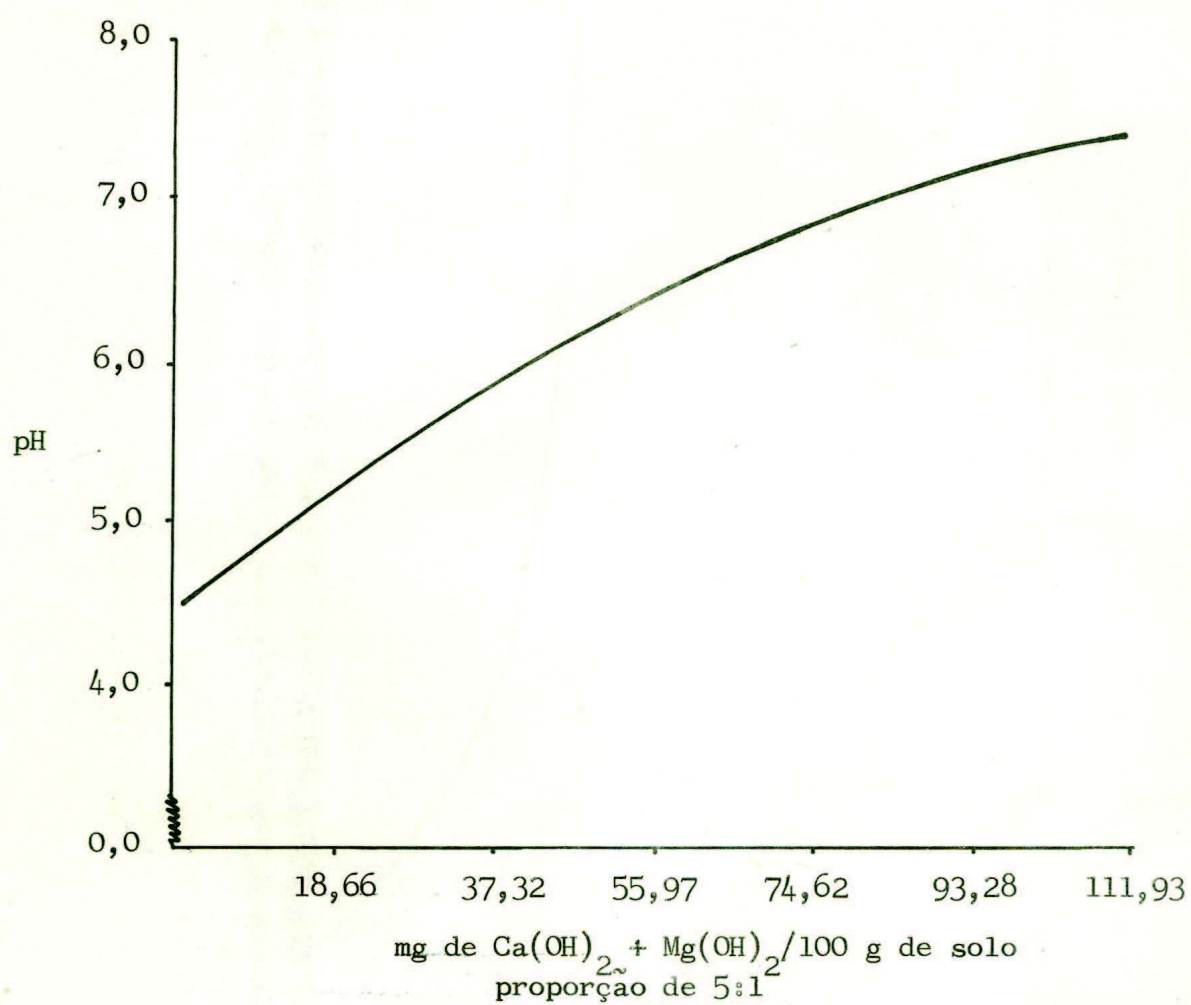


FIGURA 3A - Relação entre o pH e o aumento da quantidade de calagem pela acidez trocável no LVE.

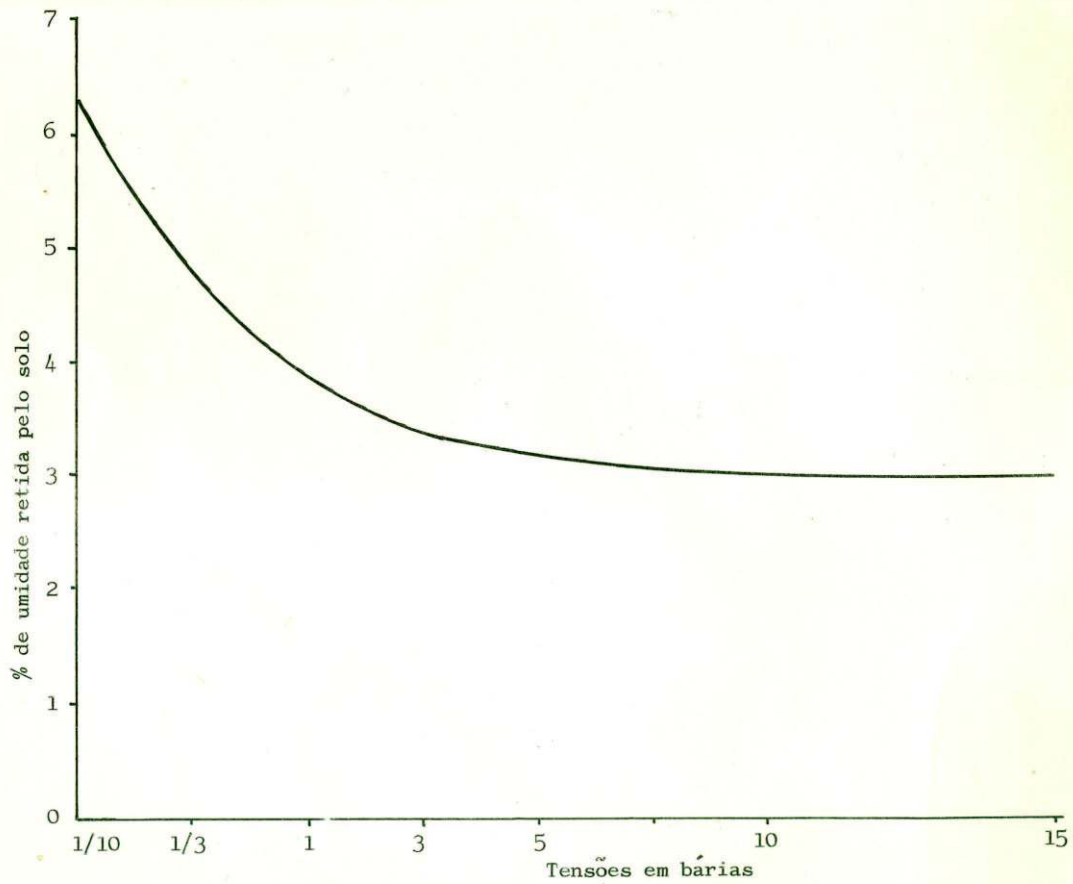


FIGURA 4A - Curva de relação de umidade obtida pelo método das tensões para o solo LVE.

Obs.: A determinação da capacidade de campo, através de tubos de plásticos, forneceu o valor de 11,6%.

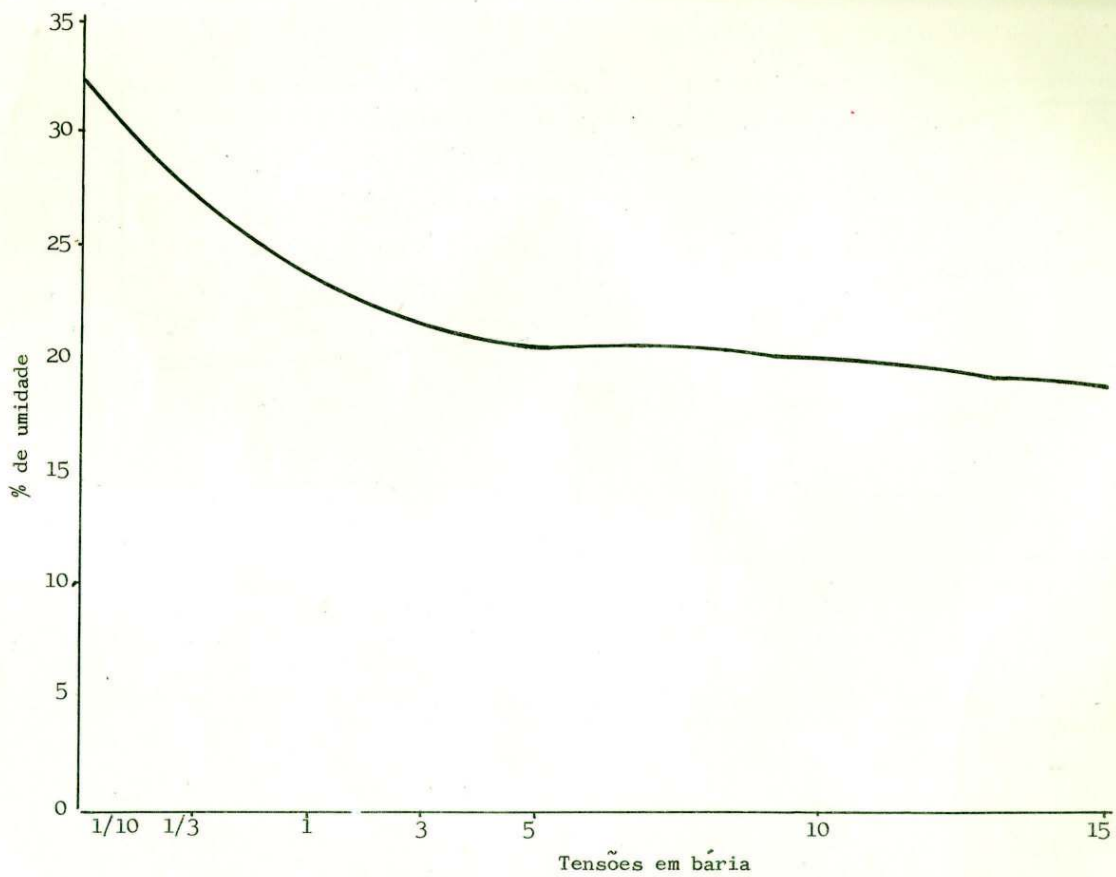


FIGURA 5A - Curva de retenção de umidade obtida pelo método de tensões para o solo LR.

Obs.: A determinação da capacidade de campo através de tubos de plástico, forneceu o valor de 25,89%.

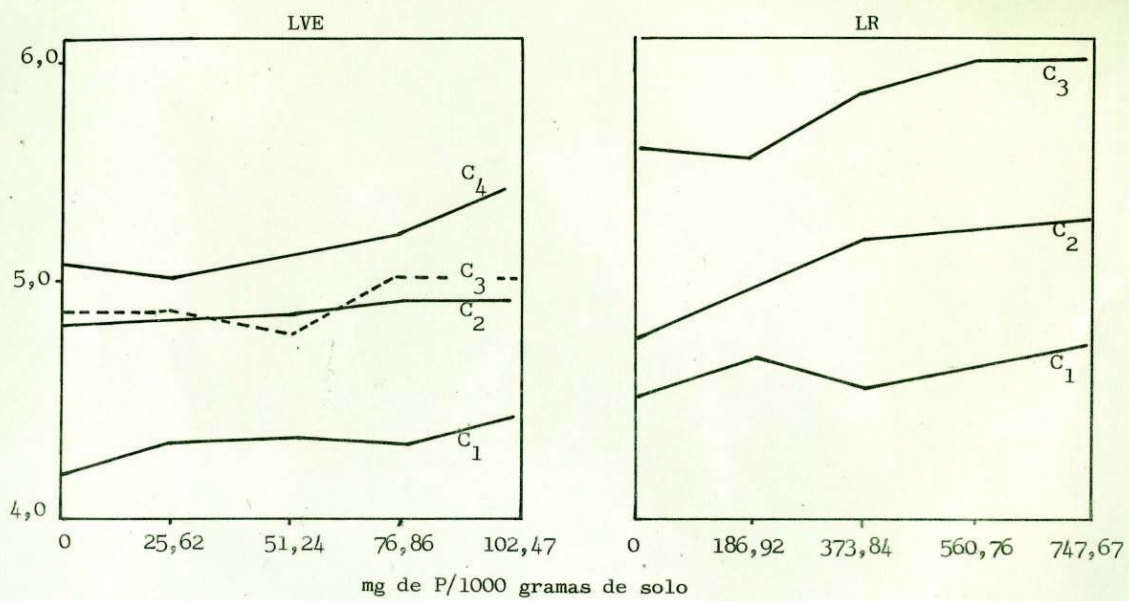


FIGURA 6A - Relação entre o pH medido após colheita e as adubações fosfatadas.
 LVE ($C_1 = 0,0$ mg de Corretivo/1000 g, $C_2 = 386,0$, $C_3 = 637,0$, $C_4 = 889,0$);
 LR ($C_1 = 0,0$ mg de Corretivo/1000 g, $C_2 = 1135,0$, $C_3 = 2425,0$)

QUADRO 1A - Variação do teor de alumínio trocável em função do nível de calagem e da adubação fosfatada nos solos LVE e LR.

Latossolo Vermelho Escuro			Latossolo Roxo		
Calagem mg /1000 g	Fósforo mg /1000 g	Al trocável eq.mg/100 g	Calagem mg /1000 g	Fósforo mg /1000 g	Al trocável eq.mg/100 g
0,00	0,00	0,93	0,00	0,00	1,23
	25,62	0,84		186,92	1,02
	51,24	0,77		373,84	0,98
	76,86	0,78		560,76	0,79
	102,47	0,78		747,67	0,72
386,00	0,00	0,38	1.135,00	180,00	0,62
	25,62	0,44		186,92	0,39
	51,24	0,40		373,84	0,41
	76,86	0,38		560,76	0,32
	102,47	0,33		747,67	0,28
637,00	0,00	0,30	2.425,00	0,00	0,20
	25,00	0,40		186,92	0,20
	51,24	0,35		373,84	0,19
	76,86	0,30		560,76	0,19
	102,47	0,34		747,67	0,19
889,00	0,00	0,23			
	25,62	0,30			
	51,24	0,19			
	76,86	0,13			
	102,47	0,15			