



ANTONIO FERNANDINO DE CASTRO BAHIA FILHO

ÍNDICES DE DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS DO PLANALTO
CENTRAL COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS TEXTURAIS
E MINERALÓGICAS

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Fitotec-
nia, para obtenção do grau de
"Doctor Scientiae".

VIÇOSA - MINAS GERAIS

1982

ÍNDICES DE DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM LATOSSOLOS DO PLANALTO
CENTRAL COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS TEXTURAIS
E MINERALÓGICAS

por

ANTONIO FERNANDINO DE CASTRO BAHIA FILHO

APROVADA:



Prof. José Mário Braga
(Orientador)



Prof. Antonio Carlos Ribeiro
(Conselheiro)



Prof. Luiz Antonio Nogueira Fontes



Prof. Mauro Resende
(Conselheiro)



Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Conselheiro)

A José Ferreira Mendes,
pelos ensinamentos, pelo exemplo
e pela amizade.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, ao Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo - EMBRAPA e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que possibilitaram a realização do Curso de Doutorado em Fitotecnia.

Ao Professor José Mário Braga, pela orientação e amizade.

Aos Professores Antônio Carlos Ribeiro, Mauro Resende e Roberto Ferreira de Novais, pelas sugestões e pelas críticas construtivas.

Ao Eng.^o-Agr.^o Carlos Alberto Vasconcellos, pelo inestimável apoio na condução dos experimentos e nas análises.

Ao Eng.^o-Agr.^o Edson Bolivar Pacheco, pela amizade e pelo apoio.

Ao Eng.^o-Agr.^o Francisco Geraldo França Teixeira de Castro Bahia, pela compreensão e pelo estímulo.

Aos colegas da área de Fertilidade e Nutrição de Plantas do CNPMS - EMBRAPA, que, com seu sacrifício, tornaram possível a realização desse curso.

Aos membros dos Departamentos de Solos e Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, que, por sua amizade, tornaram o período do curso um prolongamento do meu ambiente de trabalho.

Aos funcionários do Laboratório do CNPMS - EMBRAPA, na pessoa do Sr. Honório Rodrigues da Silveira, pela dedicação e pelo interesse dispensado aos experimentos e às análises realizadas.

A Luíza Amélia Corrêa Arruda, que, pela eficiência, dedicação e amizade, tornou menos árduo o curso realizado.

Aos funcionários da U.F.V., Pedro Ferreira Coelho e Luiz Cezar Gomes Lopes, pela colaboração dispensada durante parte da fase experimental deste trabalho.

A Jershon Ayres de Moraes, pela composição das figuras.

A Cleone G. Guerra, pelos serviços de datilografia.

Aos amigos, que, de qualquer modo, tenham contribuído para a realização deste trabalho.

A Ângela, Antônio e Juliana, que, parte do meu ser, **solidificaram** nossa vivência em todos os momentos.

BIOGRAFIA DO AUTOR

ANTONIO FERNANDINO DE CASTRO BAHIA FILHO, filho de Antônio Fernandino de Castro Bahia e Dagna França Teixeira de Castro Bahia, nasceu em Sete Lagoas, Minas Gerais, aos trinta dias de dezembro de 1947.

Cursou até o 2.^o ciclo nessa cidade, ingressando na Universidade Federal de Viçosa em 1966.

Diplomou-se em Engenharia Agrônômica e diversificou-se em Fitotecnia, pela mesma universidade. Em 1970, iniciou sua carreira profissional no Instituto de Pesquisa Agropecuária do Centro-Oeste, atualmente Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, onde vem realizando trabalhos na área de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

Concluiu seu Curso de Mestrado em Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, em 1974.

Iniciou o Curso de Doutorado em Fitotecnia, pela mesma Universidade, em março de 1980, como bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	xvi
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Adsorção de Fosfato	3
2.1.1. Isotermas e Mecanismos de Adsorção	4
2.1.2. Adsorção de Fosfato e Componentes do Solo	8
2.2. Disponibilidade de Fósforo	14
2.2.1. Intensidade e Quantidade de Fósforo	15
2.2.2. Capacidade Tampão de Fósforo	19
2.2.3. Capacidade Tampão e Características do Solo ..	20
2.2.4. Absorção de Fósforo e Adubação Fosfatada, em relação aos Fatores Intensidade, Quantidade e Capacidade Tampão	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Seleção do Material de Solos	25
3.2. Caracterização Química e Física	27
3.3. Caracterização Mineralógica	27
3.3.1. Difração de Raios X da Fração Argila	27
3.3.1.1. Obtenção da Argila Total e da Argila Fina	27
3.3.1.2. Amostra Orientada	27
3.3.1.3. Amostra em Pó	28

3.3.2. Composição Mineralógica	28
3.4. Índices de Disponibilidade de Fósforo	30
3.4.1. Isotermas de Adsorção	30
3.4.2. Intensidade	30
3.4.3. Quantidade	31
3.4.4. Fósforo Disponível	31
3.4.5. Capacidade Tampão	31
3.5. Ensaio em Casa de Vegetação	32
3.5.1. Ensaio Preliminar	32
3.5.2. Curvas de Incubação e Correção dos Materiais de Solo	33
3.5.3. Ensaio de Exaustão das Concentrações de Fósforo Adicionadas	34
3.6. Análises de Material Vegetal	36
3.7. Determinação de Níveis Críticos	36
3.8. Análises Estatísticas	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Capacidade, Intensidade e Quantidade, em Relação aos Componentes e às Características do Solo	38
4.1.1. Mineralogia da Fração Argila	38
4.1.2. Capacidade Tampão e Componentes do Solo	43
4.1.3. Adsorção de Fósforo, em relação à Calagem e à Adubação Fosfatada	50
4.1.4. Intensidade, Quantidade e Capacidade Tampão ...	56
4.1.5. Índices de Capacidade Tampão	68
4.2. Quantidade, Capacidade Tampão e Crescimento Vegetal ..	72
4.2.1. Ensaio em Casa de Vegetação	72
4.2.2. Teores de Fósforo Disponível	77
4.2.3. Fósforo Absorvido, Considerando os Fatores Quantidade e a Capacidade Tampão	83
4.2.4. Fósforo Absorvido, Considerando o Fósforo Disponível e a Capacidade Tampão	87
4.2.5. Recomendação de Adubação	121
5. RESUMO E CONCLUSÕES	133
6. LITERATURA CITADA	136
7. APÊNDICE	148

LISTA DE QUADROS

Quadros		Página
1	Características dos minerais caolinita, hematita, goethita, gibbsita, obtidas em sistemas puros ou em materiais de solo, relacionadas com a adsorção de fosfato	11
2	Classificação, identificação e procedência das amostras de material de solo utilizadas	26
3	Composição mineralógica das amostras de material de solo, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico	41
4	Composição mineralógica da fração argila, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico das amostras de material de solo ..	42
5	Parâmetros de disponibilidade de fósforo nas amostras de material de solo utilizadas	44
6	Coefficientes de correlação linear simples (r) entre a capacidade tampão máxima, os parâmetros da isoterma de Langmuir e algumas características do solo	45
7	Análise de variância da equação de regressão ajustada entre capacidade tampão máxima e componentes mineralógicos do material de solo	48
8	Análise de variância da equação de regressão ajustada entre capacidade máxima de adsorção e componentes mineralógicos do material de solo	49

Quadros

Página

9	Índices de disponibilidade de fósforo nas amostras de material de solo com calagem	51
10	Valores de energia e capacidade máxima de adsorção da equação de Langmuir para uma única superfície de adsorção, considerando a adubação fosfatada ...	53
11	Valores de energia e capacidade máxima de adsorção da equação de Langmuir para uma única superfície de adsorção, considerando a adubação fosfatada ...	54
12	Fatores intensidade, quantidade de fósforo e teores de fósforo disponível nas amostras de material de solo, considerando a adubação fosfatada	57
13	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo em solução (Y), em $\mu\text{g/ml}$, e fósforo aplicado (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo com calagem	59
14	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre quantidade de fósforo adsorvido (Y), em $\mu\text{g/g}$, e fósforo em solução (X), em $\mu\text{g/ml}$, nas amostras de material de solo com calagem	62
15	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo aplicado (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo com calagem	63
16	Coefficientes de correlação linear simples (r) entre o coeficientes P recuperado/P aplicado e diferentes parâmetros do solo	64
17	Equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, fósforo adsorvido (Q) e capacidade tampão máxima (C)	66
18	Índices de capacidade tampão de fósforo nas amostras de material de solo, considerando a adubação fosfatada	69
19	Coefficientes de correlação linear simples (r) entre capacidade tampão máxima (C_{tm}), capacidade tampão de equilíbrio (C_{te}), índice tampão (I_t) e índice de adsorção (I_a)	71

Quadros

Página

20	Produção de matéria seca de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)	73
21	Teor de fósforo na matéria seca de milho, em cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)	75
22	Quantidade de fósforo removida depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições) ..	76
23	Quantidade de fósforo acumulada removida depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)	78
24	Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1, depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)	79
25	Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Bray 1, depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)	81
26	Equações de regressão ajustadas entre fósforo absorvido, fatores quantidade, capacidade tampão e dose de fósforo aplicada	84
27	Equações de regressão ajustadas para fósforo absorvido (Y), teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 (M_1) e Bray 1 (B_1), e capacidade tampão máxima (C)	88
28	Níveis críticos de fósforo, pelos extratores químicos Mehlich 1 e Bray 1, nos materiais de solo estudados	106
29	Coeficientes de correlação linear simples (r) entre os níveis críticos de fósforo, pelos extratores químicos Mehlich 1 e Bray 1, e as características dos materiais de solo estudados	107

Quadros

Página

30	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha , com as diferentes doses de adubação fosfatada, em cada material de solo	108
31	Coefficientes das equações de regressão quadrática ajustadas entre o teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha	109
32	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha	118
33	Coefficientes de correlação linear simples (r) entre o coeficiente de P disponível/P absorvido e diferentes parâmetros do solo	119
34	Quantidades calculadas de fósforo aplicado, para elevar o teor de fósforo disponível até o nível crítico, e de fósforo absorvido, para reduzir esse teor a zero em cada material de solo	122
35	Quociente entre o coeficientes linear da regressão entre fósforo disponível e fósforo absorvido e o coeficiente linear da regressão entre fósforo disponível e fósforo aplicado, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1	125
36	Coefficientes de correlação linear (r) entre o quociente $\frac{\text{P aplicado}}{\text{P absorvido}}$ e diferentes parâmetros do solo	125
37	Relações P aplicado/P absorvido estimadas em diferentes teores de goethita, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1	126
38	Quantidade de fósforo de uma fonte solúvel, aplicada a lãço, para atingir o nível crítico pelo extrator Mehlich 1, considerando o teor de goethita no solo e a relação percentual entre o teor de fósforo disponível e o nível crítico	127

Quadros

Página

39	Quantidade de fósforo de uma fonte solúvel, aplicada a lango, para atingir o nível crítico pelo extrator Bray 1, considerando o teor de goethita no solo e a relação percentual entre teor de fósforo disponível e o nível crítico	128
1A	Análises químicas das amostras dos materiais de solo em estudo	159
2A	Características físicas e químicas das amostras dos materiais de solo utilizadas	160
3A	Teor de unidade, em relação ao potencial matricial, nos materiais de solo utilizados	161
4A	Dimensões, área e relações hematita/goethita (Hm/Go) e goethita/hematita (Go/Hm) obtidas dos picos de hematita (104) e goethita (110) nos difratogramas da fração argila, sem silicatos, na montagem em pó	162
5A	Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1, em diferentes períodos de incubação, no tratamento que recebeu 250 $\mu\text{g P/g}$ solo, (médias de três repetições)	163
6A	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelo extrator Mehlich 1, e doses de fósforo aplicadas (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo sem calagem	164
7A	Coefficientes das equações de regressão ajustadas entre pH em água (Y) e níveis de correção da acidez trocável (X) das amostras de material de solo	165
8A	Quantidade de corretivo (CaCO_3 e MgCO_3) adicionada aos materiais de solo para elevar o pH para 6,5	166
9A	Análises de fertilidade das amostras de material de solo com e sem calagem	167
10A	Doses de fósforo aplicadas e, entre parênteses, teores esperados de fósforo disponível, pelo extrator Mehlich 1, nas amostras de material de solo ..	168
11A	Composição química da solução nutritiva utilizada nos ensaios realizados em estufa	169

Quadros

Página

12A	Síntese das principais alterações na metodologia dos experimentos de exaustão da concentração de fósforo adicionada	170
13A	Quantidade de fósforo removida por lavagem dos vasos com material de solo depois do segundo cultivo (média de três repetições)	171
14A	Composição mineralógica das amostras dos materiais de solo, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico	172
15A	Análises de variância dos dados de produção de matéria seca de milho nos diferentes cultivos (quadrados médios)	173
16A	Análises de variância dos dados de quantidade de fósforo removido nos diferentes cultivos (quadrados médios)	174
17A	Análises de variância dos dados de teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1 (quadrados médios)	175
18A	Análises de variância dos dados de teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Bray 1 (quadrados médios)	176
19A	Análises conjuntas de variância dos dados de produção de matéria seca e de fósforo removido e dos teores de fósforo disponível, obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 (quadrados médios)	177
20A	Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo aplicado (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo utilizadas no cultivo sucessivo	178
21A	Doses de fósforo aplicadas e, entre parênteses, teores estimados de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, nas amostras de material de solo com calagem antes do cultivo	179

LISTA DE FIGURAS

Figuras		Página
1	Difratogramas de lâminas da fração argila, em montagem orientada, dos materiais de solo TM-5, TM-6, TM-18 e TM-42	39
2	Difratogramas de lâminas da fração argila, em montagem orientada, dos materiais de solo TM-14, TM-67, AP-Cl3 e TM-56	40
3	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-5)	89
4	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-5)	90
5	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-6)	91
6	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-6)	92
7	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-18)	93
8	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-18)	94
9	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-42)	95

Figuras

Página

10	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-42)	96
11	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-14)	97
12	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-14)	98
13	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-56)	99
14	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-56)	100
15	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo AP-C13)	101
16	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo AP-C13)	102
17	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-67)	103
18	Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-67)	104
19	Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido (Material de solo TM-5)	110
20	Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido (Material de solo TM-6)	111
21	Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido (Material de solo TM-18)	112

Figuras

Página

22	Relações entre teor de P disponível, pelos extra- tores químicos utilizados, e P absorvido (Materi- al de solo TM-42)	113
23	Relações entre teor de P disponível, pelos extra- tores químicos utilizados, e P absorvido (Materi- al de solo TM-14)	114
24	Relações entre teor de P disponível, pelos extra- tores químicos utilizados, e P absorvido (Materi- al de solo TM-55)	115
25	Relações entre teor de P disponível, pelos extra- tores químicos utilizados, e P absorvido (Materi- al de solo AP-C13)	116
26	Relações entre teor de P disponível, pelos extra- tores químicos utilizados, e P absorvido (Materi- al de solo TM-67)	117
1A	Representação gráfica da metodologia empregada na integração das curvas ajustadas entre P disponí- vel e P absorvido	158

EXTRATO

BAHIA FILHO, Antônio Fernandino de Castro, D.S. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1982. Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Professor Orientador: José Mário Braga. Professores Con^selheiros: Antonio Carlos Ribeiro, Mauro Resende e Roberto Ferreira de Novais.

Foram coletadas amostras superficiais de oito solos, com textura e mineralogia variáveis, com o objetivo de estudar a disponibilidade de fósforo. A composição mineralógica da fração argila foi estimada por meio dos óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2) e da difração de raios X. Nos materiais de solo, adubados com diferentes doses de fósforo, efetuaram-se medidas da disponibilidade desse elemento, expressas pelos fatores intensidade, quantidade, capacidade tampão e pelo fósforo disponível, determinado pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1.

Em experimentos realizados em casa de vegetação procurou-se avaliar a quantidade do fósforo aplicado removida por plantas de milho (*Pennisetum thyphoides* cv. CMS X M1) e o decréscimo nos teores de fósforo disponível, obtido com o uso dos dois extratores mencionados.

Dentre os componentes mineralógicos da fração argila, a goethita foi a principal responsável pelas variações observadas na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima de fósforo. Esse mineral esteve também associado com a redução na disponibilidade de fósforo para o vegetal com o decorrer do tempo e com a histerese observada entre o fósforo adicionado e o absorvido. Nas duas situações, mais importante que a extensão da superfície adsorvente parece ter sido a natureza da ligação estabelecida na adsor

ção.

Em todos os índices de capacidade tampão utilizados (capacidade tampão máxima e de equilíbrio e índice tampão e de adsorção) foram verificadas reduções, derivadas da adubação fosfatada, associadas com a diminuição da energia de retenção. Tais índices foram igualmente eficientes na previsão do fósforo absorvido, juntamente com o fator quantidade. Pelos modelos matemáticos obtidos, espera-se, para a mesma quantidade de fósforo adsorvido, maior absorção de fósforo no solo com menor capacidade tampão, o que também é previsto quando se considera o fósforo aplicado.

Os teores de fósforo obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 refletiram a sensibilidade dos extratores à capacidade tampão. O aumento desses teores em consequência da adubação fosfatada correlacionou-se negativamente com a capacidade tampão máxima. Por outro lado, o decréscimo nos teores de fósforo disponível, decorrente da absorção de fósforo pelo vegetal, relacionou-se também negativamente com a extensão da superfície adsorvente. Dessa forma, esses teores não parecem indicar as alterações na energia de adsorção de fósforo. Desde que o teor de fósforo disponível encontre-se no nível crítico, a quantidade de fósforo que pode ser absorvida, em diferentes materiais de solo, é praticamente constante. De acordo com esse princípio, pode-se recomendar a adubação fosfatada com base no teor de goethita no solo e na relação entre o teor de fósforo disponível e o nível crítico.

1. INTRODUÇÃO

A sorção de fósforo é um dos aspectos mais intensamente pesquisados em solos. O esforço da pesquisa reflete não só a importância e complexidade do problema, mas, muitas vezes, a dificuldade de sistematização dos conhecimentos já obtidos. Uma vez que a sorção de fósforo é um fenômeno principalmente de superfície, é possível exprimi-la matematicamente por meio de modelos tais como os de Langmuir, Freundlich, Tenkim e Bowden. A maioria dos modelos matemáticos despreza o fato de que a sorção de fósforo se processa numa superfície com carga elétrica.

Considerável avanço tem sido verificado em estudos de laboratório referentes a minerais puros e à caracterização da natureza e extensão da ligação entre o fósforo sorvido e a superfície sorvente. Há, entretanto, dificuldades na transposição desses conhecimentos para o sistema solo, em razão de alterações na forma e no grau de cristalinidade dos minerais presentes, além da interação de componentes.

Do ponto de vista agrônômico, interessa saber a quantidade de fósforo que pode ser utilizada pelo vegetal, em relação ao fósforo que foi retido na fase sólida, depois de efetuada a adubação fosfatada. Essa quantidade reflete a mudança do fósforo da fase sólida para a fase líquida e a renovação do fósforo em solução durante o período de absorção.

Essa dinâmica é descrita, atualmente, pelos fatores intensidade, quantidade e capacidade tampão de fósforo, que representam a aplicação de conhecimentos de natureza físico-química no sistema solo-solução.

Os extratores químicos utilizados em análises de rotina, embora

sejam de natureza empírica, são aceitos como indicadores da disponibilidade de fósforo. Extraem parte da reserva de fósforo do solo, constituída de fósforo lábil e não-lábil e, desde que haja relação entre a quantidade extraída e o crescimento vegetal, são denominados extratores de fósforo disponível. Ao empirismo dos extratores têm sido adicionados parâmetros que podem representar a capacidade tampão, propiciando melhores condições de avaliação da disponibilidade de fósforo.

A associação de parte dos conhecimentos da natureza da superfície de minerais de argila, referentes à sorção aniônica, e da disponibilidade de fósforo fundamenta o presente trabalho, que tem como objetivo verificar o comportamento adsorptivo dos componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos, bem como relacionar índices de disponibilidade de fósforo com o crescimento vegetal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Adsorção de Fosfato

O fenômeno de retenção de fósforo no solo é conhecido há mais de um século, através do trabalho de Thomas Way, em 1850 (SAMPLE et alii, 1980). A partir dessa época, numerosos trabalhos têm sido desenvolvidos, com o objetivo de estabelecer a natureza do fenômeno, seus mecanismos e sua importância na utilização da adubação fosfatada pelo vegetal.

A complexidade do problema pode ser apreciada através de algumas das várias revisões existentes (DEAN, 1949; WILD, 1950; LARSEN, 1967; PARFITT, 1978). Evidentemente, muita controvérsia tem surgido a respeito da terminologia empregada para descrever o processo de retenção de fósforo. Essa variação conceitual engloba desde a completa irreversibilidade do fósforo retido, pelo termo fixação (DEAN, 1949; WILD, 1950), a conceitos de adsorção física, quimiossorção, troca aniônica, precipitação superficial e precipitação de fases sólidas separadas (SAMPLE et alii, 1980).

Para descrever a adsorção têm sido empregadas equações como a de Langmuir e Freundlich, bem como a de Tenkin (OLSEN e KHASAWNEH, 1980). Recentemente, BOWDEN et alii (1977, 1980) propuseram um modelo de adsorção em superfícies de carga variável em que se considera a carga, tanto da superfície quanto da espécie adsorvida, e a mudança na carga da superfície, quando ocorre a adsorção.

2.1.1. Isotermas e Mecanismos de Adsorção

As isotermas de adsorção de fosfato obtidas são, em sua maioria, ajustadas às equações de Langmuir e Freundlich.

A equação de Langmuir, originalmente desenvolvida para adsorção de gases em sólidos, foi utilizada pela primeira vez para adsorção de fósforo em solo por OLSEN e WATANABE (1957). Desde então, inúmeros trabalhos têm utilizado o modelo de adsorção a uma superfície.

A equação de Langmuir representa uma hipérbole expressa por

$$x = \frac{k x_m c}{1 + kc} \quad (1)$$

em que

x = quantidade do íon adsorvido

k = constante de equilíbrio, relacionada com a energia de adsorção

x_m = adsorção máxima

c = concentração de equilíbrio

O modelo de Langmuir pressupõe, para adsorção de gases a superfícies sólidas, que a adsorção seja restrita a uma camada monomolecular e que a energia de adsorção não varie conforme a superfície já coberta. Isso implica que os pontos ou locais de adsorção devem ser isolados e uniformes, quanto à energia de retenção, e que as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras (PARFITT, 1978).

Na forma linear, a equação de Langmuir pode ser expressa por

$$\frac{c}{x} = \frac{1}{k x_m} + \frac{1}{x_m} \cdot c \quad (2)$$

em que o significado dos termos é o mesmo da equação 1.

Essa transformação tem sido largamente utilizada pela facilidade oferecida pelo ajuste linear. No entanto, OLSEN e KHASAWNEH (1980) advertem que a obtenção de altos coeficientes de correlação no ajuste de c/x contra c não é a medida apropriada para considerar satisfatório o ajustamento obtido. Nesse caso, os métodos de regressão não-linear seriam mais apropriados para fornecer um ajustamento que satisfizesse a exigência de obtenção do quadrado mínimo do erro.

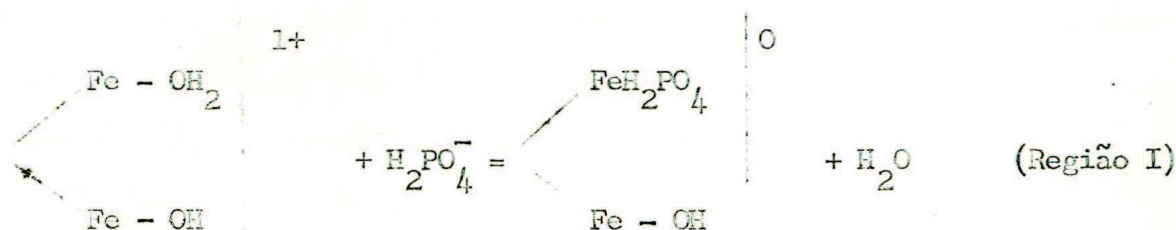
Em muitos casos, conforme mostra LARSEN (1967), a relação obtida não é retilínea, mas curvilínea. Os melhores ajustes são obtidos quando se considera mais de uma superfície de adsorção (MULJADI *et alii*, 1966a; SYERS *et alii*, 1973; HOLFORD *et alii*, 1974; RAJAN e FOX, 1975; RYDEN *et alii*, 1977a; RYDEN e PRATT, 1980).

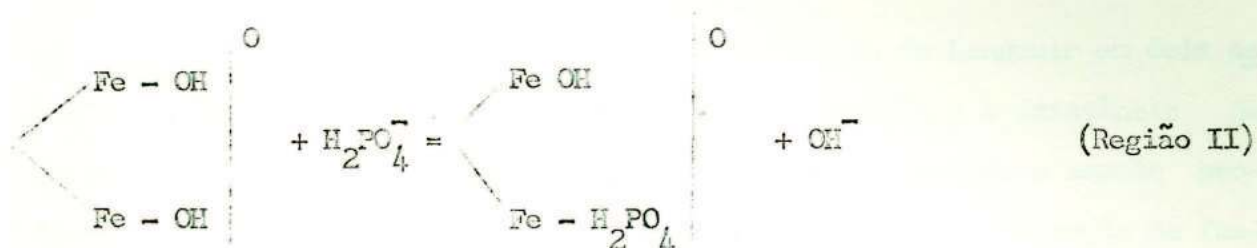
A pressuposição básica é que a adsorção verifica-se em sítios diferentes. Para a identificação desses sítios é necessário, no entanto, conhecer o(s) mecanismo(s) envolvido(s) no processo. No que diz respeito a solos encontram-se referências às correlações entre adsorção máxima e alumínio, ferro, matéria orgânica, cátions trocáveis, pH e argila (PARFITT, 1978). A comparação dos resultados obtidos é, contudo, difícil, tendo em vista as variações nas metodologias empregadas na obtenção dos dados. Por outro lado, nem sempre o mecanismo envolvido é considerado ou mesmo proposto. Parece claro, no entanto, que os locais para adsorção aniônica no solo são os grupos $AlOH$ e $FeOH$ presentes na borda de minerais de argila e na superfície de óxidos hidratados (PARFITT, 1978).

A existência de superfície de adsorção de natureza diferente foi sugerida, inicialmente, por BACHE (1964), para gibbsita, como sendo composta de três regiões. A primeira ocorreria em baixas concentrações e elevada energia de quimiossorção, a segunda seria uma precipitação do fosfato e a terceira a adsorção de baixa energia ao precipitado. Posteriormente, MULJADI *et alii* (1966a, b, c) apresentaram mecanismo semelhante para caolinita, gibbsita e pseudoboenita, incluindo variações de pH e concentração de fósforo nas características das três regiões de adsorção. Na região I, com maior energia de adsorção, há troca entre o grupamento OH do óxido hidrata

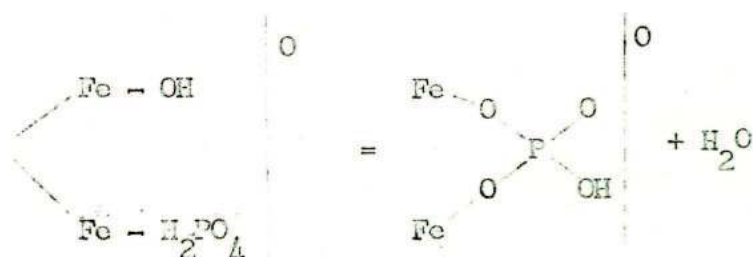
do ou da caolinita e o ânion H_2PO_4^- . A região II apresenta a mesma característica de troca, porém com menor energia, e corresponde a concentrações maiores de fósforo. Na última região (III), penetração do fósforo em alguma região menos cristalina do mineral de argila. A reversibilidade do fósforo adsorvido, quanto ao pH, foi observada em todas as três regiões, sendo restrita, com relação à concentração, apenas às regiões II e III. Para gibbsita e pseudoboemita, a reversibilidade observada foi bem menor. A existência de regiões de adsorção foi também verificada em Latossolos do Planalto Central Brasileiro por LEAL e VELOSO (1973) e VASCONCELOS *et alii* (1974), tendo sido verificada redução da adsorção com o aumento do pH e maior reversibilidade do fósforo adsorvido com aumentos de concentração de fósforo e pH. De maneira semelhante à proposição de MULJADI *et alii* (1966a, b, c), RYDEN *et alii* (1977a) encontraram três regiões de adsorção de fósforo, identificadas como de natureza química e física. A identificação das regiões foi efetuada mediante ajuste de uma série de equações de Langmuir. A primeira região envolve a quimiossorção de fósforo à superfície protonada, envolvendo na troca o ligante OH_2^+ . A segunda região, também de adsorção química, envolve na troca o ligante OH, e a terceira é de caráter mais físico do que químico. Nessa região o fósforo adsorvido tem baixa energia de ligação, uma vez que o potencial da superfície, depois da quimiossorção completa, é próximo de zero. A superfície adsorvente também não é a mesma das regiões I e II, uma vez que é constituída tanto de grupos OH quanto de fósforo adsorvido quimicamente.

Na região I, depois da adsorção química, há aumento de carga negativa, que na região II, ao contrário, não varia (RYDEN *et alii*, 1977a):





A cinética de adsorção, estudada por RYDEN *et alii* (1977b), mostrou, no entanto, que há passagem do fósforo adsorvido na região III para a forma de quimiossorção das regiões I e II. Essa passagem envolve a existência de novos sítios de adsorção, que é atribuída por RYDEN *et alii* (1977b) à difusão de fósforo em poros estruturais no material amorfo presente. No entanto, a redução na concentração de fósforo em equilíbrio com o tempo pode ser também atribuída à formação de complexo binuclear, mediante a condensação dos grupos hidroxila e fosfato na superfície adsorvente, conforme foi demonstrado por PARFITT *et alii* (1975):



Essa reação implica a redução da disponibilidade do fósforo aplicado para o vegetal com o tempo. O modelo proposto foi confirmado posteriormente por RYDEN e SYERS (1977), mediante ensaios de dessorção. Verificaram que na quimiossorção a reversibilidade do fósforo adicionado somente ocorria com aumento de pH, ao passo que o fósforo adsorvido na região III era dessorvido sem essa variação. O fósforo retido na região III seria a fonte de fósforo lábil para o vegetal. Entretanto, a formação de complexos indicada por PARFITT *et alii* (1975) somente admite que o fósforo seja quimioadsorvido, não se verificando adsorção de natureza física.

Um modelo mais genérico de adsorção foi proposto por BONDEN *et alii* (1977, 1980), aplicável à superfície de natureza anfotérica, podendo ser utilizado para íons de adsorção não específica e específica (KINGSTON

et alii, 1967). Esse modelo difere, basicamente, do de Langmuir em dois aspectos. Considera a espécie iônica presente na solução e a existência de um potencial eletrostático no plano de adsorção. Utilizando o modelo proposto, BOWDEN et alii (1980) associaram o efeito do pH na adsorção de fosfato às alterações do potencial eletrostático e da proporção das espécies iônicas presentes. Por outro lado, como a adsorção de fosfato torna a superfície mais negativa, há decréscimo do potencial eletrostático, o que torna a adsorção cada vez mais difícil. Dessa forma, segundo os autores, para pH constante, a equação de Langmuir torna-se ineficiente na descrição do fenômeno. Aplicando esse modelo, POSNER e BOWDEN (1980) demonstraram que não há motivo aparente para que se proponha a existência de várias superfícies de adsorção (MULJADI et alii, 1966a; SYERS et alii, 1973; RAJAN e FOX, 1975; HOLFORD et alii, 1974; RYDEN et alii, 1977a; RYDEN e PRATT, 1980) ou mesmo para distinguir adsorção química de adsorção física, como o fizeram RYDEN et alii (1977a). A força motriz responsável pela adsorção seria uma reação de troca de ligante (H_2O ou OH), cuja energia livre é continuamente reduzida pelo acréscimo da carga negativa da superfície e do íon, o que ocorre com aumento do pH e da adsorção. Esse comportamento não é descrito pela isoterma de Langmuir e, para POSNER e BOWDEN (1980), subdividi-la em regiões é um exercício de futilidade, não tendo significado físico, a não ser, talvez, que a subdivisão se correlacione com a mudança de carga na superfície adsorvente.

2.1.2. Adsorção de Fosfato e Componentes do Solo

São pouco comuns, na literatura, os casos em que a adsorção de fósforo é relacionada com a mineralogia do solo.

Permanece uma lacuna nessa área de conhecimento, representada pela tendência observada de trabalhos em laboratório com sistemas isolados de minerais puros, com pouca relação com componentes do solo. Uma tentativa de relacionamento nessa área foi efetuada por JUO e FOX (1977), incluindo uma classificação de capacidade de adsorção, de acordo com a mineralo-

gia usualmente encontrada em solos. Essa classificação, genericamente, indica que solos mais intemperizados requerem maior quantidade de adubação fosfatada para um mesmo nível de fósforo em solução. A capacidade de adsorção, segundo os autores citados, relaciona-se principalmente com a mineralogia do solo, nos aspectos de natureza e efetividade da superfície de adsorção. Também de forma genérica, FOX e SEARLE (1978) indicaram que a adsorção de fósforo em solos tropicais poderia ser classificada, segundo a sua mineralogia, na seguinte ordem: quartzo, alumínio na matéria orgânica < argilas 2:1 < argilas 1:1 < óxidos cristalinos de ferro e alumínio < óxidos amorfos de ferro e alumínio.

Aos óxidos amorfos tem sido atribuído o papel de principal componente na adsorção de fosfato em solos intemperizados (SYERS *et alii*, 1971; LEAL e VELOSO, 1973; SANTANA, 1973). Contudo, a designação amorfo, pelo menos para óxido de ferro, parece ser apenas uma fase operacionalmente definida (RESENDE, 1976). NALOVIC *et alii* (1975) sugeriram que não há óxidos de ferro amorfos verdadeiros, mas materiais cristalizados ultrafinos, que não são detectáveis pelo raio X. Assim, a falta de morfologia definida e de picos de difração de raio X levou muitos pesquisadores a acreditar que a maioria dos óxidos pedogênicos fosse amorfa (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1981). O uso de técnicas avançadas, como espectroscopia Mössbauer (NALOVIC *et alii*, 1975; BIGHAN, 1977; SCHWERTMANN e TAYLOR, 1981) e difração de raio X diferencial (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1981), demonstra, claramente, a cristalinidade dos óxidos de ferro tidos como amorfos.

São poucas, no entanto, as tentativas de relacionamento entre adsorção de fosfato e componentes mineralógicos do solo. Nessa linha, RESENDE (1976) verificou que, aparentemente, não há diferença entre hematita e goethita na adsorção de fósforo. Ressaltou, no entanto, que a substituição isomórfica de ferro por alumínio na goethita pode influenciar a dessorção do fosfato adsorvido. O material de argila goethítico aparenta ser, segundo BIGHAN (1977), mais reativo, para retenção de fósforo, que o material hematítico. Os dados obtidos por esse autor não fornecem, contudo, indicações de que haja relação funcional entre composição mineralógica e adsor -

ção de fosfato. O uso de minerais sintetizados nos estudos de adsorção tem-se intensificado nos últimos anos, por causa das facilidades de obtenção e de desenvolvimento do trabalho experimental. Essas facilidades têm levado pesquisadores, como SCHWERTMANN e TAYLOR (1981), a recomendar a utilização de materiais sintéticos no estudo de propriedades de superfície, nos processos de formação de solo, além do efeito dos óxidos na superfície, mediante simulação da sua interação com outras componentes. Outra linha de pensamento defende a utilização de materiais de solo como referenciais para esse tipo de estudo, tendo em vista a diversidade e as interações das componentes.

Algumas informações acerca de características dos componentes caolinita, hematita, goethita e gibbsita estão sumariadas no Quadro 1. As características fornecidas referem-se a minerais puros ou a materiais de solo e abrangem os quatro componentes mineralógicos citados, pela ocorrência em Latossolos brasileiros (LEAL e VELOSO, 1973; SANTANA, 1973; RESENDE, 1976; BIGHAN, 1977; REZENDE, 1980).

Embora bem definidos nos minerais puros, a morfologia e o tamanho dos cristais podem ser bastante variáveis em materiais de solo, alterando a superfície ativa para adsorção.

Não há dúvidas acerca da natureza dos sítios de adsorção de fosfato, muito embora os óxidos de alumínio, pela sua carga positiva em meio ácido e reduzida tendência à hidrólise, possam ser adsorvidos à superfície de minerais de argila (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1981). Os óxidos de ferro, pela maior tendência à hidrólise completa, não desenvolvem cargas para atração eletrostática (Coulomb) na faixa de pH usualmente encontrada nos solos (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1981). Podem existir no solo como partículas pequenas, discretas ou microagregados, misturados, ao acaso, com cristais de caolinita sem revestimento (KÄMPF e SCHWERTMANN, 1980). A idéia de ocorrência de óxidos de ferro como capeamento de minerais de argila é, no entanto, bem difundida (SCHWERTMANN e TAYLOR, 1977).

Apenas para goethita, parece não haver dúvidas acerca do mecanismo de adsorção envolvido. Para as demais componentes não há definição cla-

QUADRO 1 - Características dos minerais caolinita, hematita, goethita e gibbsita, obtidos em sistemas puros ou em materiais de solo, relacionadas com a adsorção de fosfato

Características	Componente				Observações
	Caolinita	Hematita	Goethita	Gibbsita	
Fórmula	$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	$\alpha(\text{Fe}_{1-x}, \text{Al}_x)_2\text{O}_3$	$\alpha(\text{Fe}_{1-x}, \text{Al}_x)\text{OOH}$	$\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$	x representa a substituição de Fe por Al, expresso na fração molar.
Morfologia dos cristais	Placas hexagonais	Placas hexagonais (1)	Acicular (1)	Placas hexagonais (2)	A caolinita pode apresentar desde a forma de placas hexagonais até forma tubular semelhante à haloisita, passando pelas formas intermediárias (3). A forma acicular do cristal de goethita é menos desenvolvida em solos que em sistemas puros (1). A presença de elementos-traços inibe o processo de cristalização dos compostos de ferro, induzindo a formação de cristais ultrafinos (4). A gibbsita apresenta-se bem cristalizada, em cristais grandes (2).
Substituição isomórfica de Fe por Al (mol%)		6 e 7 concreções (5)	15 a 30 em solo (6) 2,8 a 38 em Latossolos (7, 8, 9)		A substituição de Fe por Al na goethita leva a pior cristalização e à formação de cristais de menor tamanho (6).
Sítios de adsorção de fósforo	Grupos $\text{Al}(\text{OH})_2$ (10, 11)	Grupos FeOH (12)	Grupos FeOH (12)	Bordas grupos $\text{Al}(\text{OH})\text{H}_2\text{O}$ (13)	Esses grupos podem apresentar-se protonados a baixo pH, dando AlOH_2^+ e FeOH_2^+ (12).
Mecanismos de adsorção de fosfato	Troca ligante, complexo monodentado (10). Complexo bidentado (14)	Complexo monodentado $\text{Fe}_2\text{OPO}(\text{OH})_2$ (15). Complexo bidentado ou binuclear (16). Troca ligante OH_2^+ e OH^- (17)	Complexo bidentado ou binuclear $\text{Fe}_2\text{OPO}(\text{O})_2\text{Fe}$ (16), (18)	Troca ligante, complexo monodentado (19). Complexo bidentado (13, 16)	Espera-se maior reversibilidade do fósforo adsorvido no complexo monodentado que no bidentado ou binuclear (19). Parte do fósforo adsorvido à caolinita tem baixa reversibilidade (14).
Capacidade de adsorção de fosfato $\mu\text{mol/g}$	16,2; 29,5 a pH = 3,0 (10) 20 (20)	170 a pH 3,5 (16) 101 a pH 4,0 (17) 125 (20)	210 a pH 3,5 (16) 103 (20)	70 (13) 450 a pH 3,0 (10) 200 a pH 4,0 (21) 32 (20)	A cristalinidade da gibbsita é fator determinante na quantidade de fósforo adsorvida (12). Gel de Al adsorve cerca de 30 a 70 vezes mais que óxidos cristalinos (20).

Continua ...

QUADRO 1 - Continuação

Características	Componente				Observações
	Caolinita	Hematita	Goethita	Gibbsita	
Área ocupada por um ânion fosfato (nm^2)	0,28 e 0,41 (10)	0,22 (15, 16)	0,66 (16)	0,16 a 0,21 (21)	A maior área ocupada pelo ânion fosfato indica uma cobertura menos densa da superfície.
Superfície específica (m^2/g)	12; 40 (10)	22 (16) 21 (17) 18 (20)	80 (16) 17 (20)	48 (10) 47 (21) 15 (20)	A área da borda do grupo reativo pode, em alguns casos, apresentar melhor relação com a adsorção que a superfície específica do material adsorvente (10). Na preparação de hematita há, usualmente, pequena quantidade de goethita. Óxidos de Fe em material de solo - 60 a 330 m^2/g (7).
Quantidade adsorvida/área ($\mu\text{mol P}/\text{cm}^2$).	1,4; 0,7 a pH 3,0 (10)	7,7 a pH 3,5 (16) 7,7 a pH 4,0 (17)	2,6 a pH 3,5 (16) 2,4 (22)	9,4 a pH 3,0 (10) 4,3 a pH 4,0 (21)	
$\cdot 10^4$	1,1 (20)	6,9 (20)	6,1 (20)	2,1 (20)	
Tamanho de cristal (nm)		27 de raio assumindo de partícula esférica (17)	20, em solo (3) largura - 6; comprimento 30 a 50 assumindo forma tubular (16)	130 (dimensão do lado do hexágono (21)	Óxidos de ferro estão concentrados na fração argila muito fina ($< 0,2 \mu\text{m}$), são cristalinos, mas finamente divididos, com diâmetro efetivo de partícula ao redor de 10 nm (7).

(1) SCHERTMANN e TAYLOR (1977); (2) HSU (1977); (3) SANTOS (1975); (4) MALOVIC *et alii* (1975); (5) SOARES (1960); (6) MORRISI e TAYLOR (1961); BIGHAM (1977); (8) RESENDE (1966); (9) RESENDE (1980); (10) MILJADI *et alii* (1966a); (11) MILJADI *et alii* (1966b); (12) PARFITT (1978); (13) PARFITT *et alii* (1977); (14) KAFRAFI *et alii* (1957); (15) JURINAK (1966); (16) PARFITT *et alii* (1975); (17) BREEUWSMA (1973); (18) ATKINSON *et alii* (1974); (19) HINGSTON *et alii* (1974); (20) McLAUGHLIN *et alii* (1981); (21) KYLE *et alii* (1975); (22) BONDEN *et alii* (1980).

ra do mecanismo atuante. Em todos eles, há a troca de ligante, estabelecendo-se uma ligação de natureza covalente.

A comparação entre valores de capacidade de adsorção é difícil, tendo em vista as diferenças de metodologia empregada, como quantidade de fósforo adicionada que determina o mecanismo de retenção; tipo de composição e pH da solução matriz, que influenciam a cinética e a extensão da adsorção; relação solução:sólido, que também influencia a cinética da adsorção; secagem prévia dos componentes, antes da utilização, que altera o ponto de carga zero das superfícies M-OH; tempo de contato (McLAUGHLIN et alii, 1981).

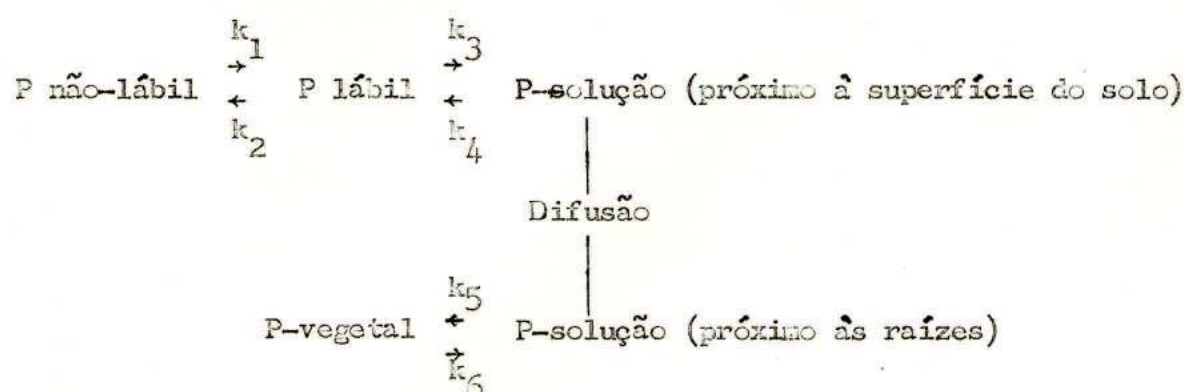
Com tais variações, que podem ocorrer associadas a fatores como tamanho de cristal e grau de cristalinidade, são compreensíveis as diferenças entre os valores de capacidade de adsorção encontrados por McLAUGHLIN et alii (1981) para goethita e gibbsita e os demais valores do Quadro 1. Variações metodológicas e de material determinam ainda as discrepâncias observadas na superfície específica do mineral e na quantidade de fósforo adsorvida por unidade de área. Parece que mais importante que a superfície específica do mineral é a área disponível do grupamento ativo para adsorção. Em razão disso, valores de superfície específica encontrados para óxidos de ferro em material de solo, por BIGHAN (1977), não se correlacionaram com a quantidade de fósforo adsorvido. Um índice que preliminarmente se apresenta como promissor é o tampão de hidroxilas (McLAUGHLIN et alii, 1981), que é uma estimativa da quantidade de superfície do tipo OH_2^+ e OH que, potencialmente, pode adsorver fosfato.

A substituição isomórfica de ferro por alumínio, na goethita, é, hoje, amplamente conhecida (NORRISH e TAYLOR, 1961; RESENDE, 1976; BIGHAN, 1977; REZENDE, 1980). Sua interferência na dessorção de fosfato permanece no campo especulativo. Considerando os resultados de HINGSTON et alii (1974), de maior reversibilidade do fósforo adsorvido à gibbsita que do adsorvido à goethita, pode-se prever que a dessorção deveria ser maior na goethita substituída que no mineral puro.

2.2. Disponibilidade de Fósforo

A conceituação de disponibilidade proposta por BRAY (1947) envolve apenas o relacionamento, em determinado momento, entre a quantidade do nutriente e o crescimento vegetal. Normalmente, são empregadas substâncias para extrair o nutriente e, desde que haja o relacionamento citado, tem-se um extrator da forma disponível. O valor obtido é de natureza estática, não fornecendo maiores informações acerca da reposição, pela fase sólida do solo, do nutriente removido. Em contraste com o empirismo dos extratores, há outros conceitos que objetivam descrever a dinâmica do nutriente no solo. Tais conceitos englobam os fatores intensidade, quantidade e capacidade tampão e constituem a base físico-química da disponibilidade de fósforo.

A absorção de fósforo pelas plantas pode ser esquematicamente representada pela seguinte equação, adaptada de GUNARY e SUTTON (1967) e LARSEN (1967):



A disponibilidade depende da reserva de fósforo no solo (P lábil) e do nível desse elemento na solução, da velocidade de movimentação da fase sólida para a fase líquida do solo (relação k_3/k_4) e da difusão do elemento até a superfície das raízes. A absorção é regulada pelas constantes k_5 (influxo), que é limitante somente em altas concentrações de fósforo, e k_6 (efluxo), que é desprezível para plantas em intenso crescimento.

A reposição do P lábil é efetuada pelo P não-lábil, a taxa muito

inferior à definida pelas constantes k_3 e k_4 . Tanto na movimentação da fase sólida para a fase líquida, quanto na difusão da superfície da fase sólida para as raízes, há resistências que devem ser vencidas. Embora não haja concordância perfeita entre conceitos, pode-se identificar no fósforo em solução o fator intensidade, no fósforo lábil o fator quantidade e nas resistências do solo a capacidade tampão. A interrelação desses três fatores define a reposição de fósforo na solução do solo, quando sua concentração é reduzida. Para o estabelecimento de relações funcionais com a absorção de fósforo pelo vegetal, é necessário o conhecimento de pelo menos dois fatores, quando há linearidade entre quantidade e intensidade (KHASAWNEH, 1971).

2.2.1. Intensidade e Quantidade de Fósforo

O fator intensidade é usualmente medido pela concentração de fósforo ou pela atividade de íons ortofosfato em solução, pelo potencial químico de $H_2PO_4^-$ e pelo potencial de fosfato monocálcico (OLSEN e KHASAWNEH, 1980).

A concentração de fósforo, embora seja o menos adequado do ponto de vista físico-químico, é a mais utilizada. Os demais métodos utilizam atividades calculadas com base na equação de Debye-Huckel (ADAMS, 1971):

$$-\log f_i = \frac{A z_i^2 (\mu)^{1/2}}{1 + B a_i (\mu)^{1/2}} \quad \text{na qual}$$

f é o coeficiente de atividade do íon i

z_i é a valência

a_i é o parâmetro do tamanho do íon

A e B são constantes, dependentes da temperatura (a 25°C $A = 0,509$ e $B = 0,329$)

μ é a força iônica da solução, dada por

$$\mu = 1/2 \sum c_i z_i^2 \quad \text{em que}$$

c_i é a concentração molar do íon em solução e z é a sua valência.

A atividade do íon é calculada pelo produto da concentração molar pelo coeficiente de atividade.

Várias tentativas têm sido feitas para relacionar o crescimento vegetal com um valor crítico do fator intensidade. Os resultados até agora obtidos são extremamente variáveis (ASLYNG, 1954; KAMPRATH e WATSON, 1980), sugerindo que, ao lado das diferenças entre espécies (FOX, 1979), os solos variam na sua capacidade de manutenção do fósforo em solução. Falha semelhante pode também ser localizada no uso da isoterma de adsorção para determinar a recomendação de adubação fosfatada, objetivando valores predeterminados de fósforo em solução (BECKWITH, 1965; FOX e KAMPRATH, 1970; PEASLEE e FOX, 1978). Nesse caso, embora a isoterma forneça uma indicação da capacidade tampão, o valor crítico de fósforo em solução não é o mesmo para todos os solos, uma vez que esses variam no fator reposição. Assim, a medida do fator intensidade de forma isolada só é útil para solos de mesma capacidade tampão (RAJAN, 1973).

O fator quantidade mede a reserva de fósforo no solo e é constituído pelo fósforo facilmente trocável com a solução (P-lábil), que é renovado, embora a baixa velocidade, pelo fósforo não-lábil. Pode ser avaliado, no caso de fósforo, por troca isotópica (valores E e L (GUNARY e SUTTON, 1967; BACHE e ROGERS, 1970; HOLFORD *et alii*, 1974)), por isotermas de adsorção (HOLFORD e MATTINGLY, 1976a; OLSEN e KHASAWNEH, 1980), por resina trocadora de ânions (BACHE e ROGERS, 1970; OLSEN e KHASAWNEH, 1980), pelo fracionamento de formas de fósforo (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975b; NOVAIS e KAMPRATH, 1978; OLSEN e KHASAWNEH, 1980) por extratores químicos (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975b; MATTINGLY, 1980; OLSEN e KHASAWNEH, 1980) e pelo fósforo absorvido pelo vegetal (VIEIRA e BORNEMISZA, 1968).

Com qualquer dos procedimentos, objetiva-se medir a reserva de fósforo que constitui a fonte de suprimento quando é removido da solução do solo. No entanto, a sensibilidade dos métodos é variável nesse aspecto, verificando-se situações em que há remoção do fósforo lábil e não-lábil (extratores e fracionamento). Outro fator normalmente não considerado refere-se à histerese existente entre o fósforo adsorvido e o desorvido que não é considerada nas isothermas de adsorção, as quais pressupõem reversibilidade completa. Não há também separação entre os fatores intensidade e quantidade, quando se utilizam resina trocadora e extratores químicos.

Em trabalhos desenvolvidos em casa de vegetação, quando o volume de solo explorado pelas raízes é limitado, a absorção depende principalmente do fator quantidade (KHASAWNEH, 1971). Tal fato pode limitar conclusões como a de VAN RAIJ (1970), que, em revisão do assunto, concluiu que o fator quantidade é a principal componente a ser considerada em análises de solo. No entanto, tal conclusão foi baseada em trabalhos conduzidos em casa de vegetação.

A utilização de extratores tem sido baseada no conceito, anteriormente discutido, de disponibilidade de BRAY (1947). Tais substâncias químicas não extraem compostos químicos definidos, como acentua FASSBENDER (1966), alterando ainda, durante seu uso, as características do solo.

Com o advento do fracionamento de formas inorgânicas de fósforo (CHANG e JACKSON, 1957), admitiu-se, durante muito tempo, que seria possível identificar as formas de fósforo que seriam removidas preferencialmente pelos extratores ou absorvidas pelas plantas. Ao lado dos problemas metodológicos, como a distinção entre as formas ligadas a alumínio e a ferro (FIFE, 1963; SMITH, 1965), há considerável dúvida acerca da sua aplicação, por causa da variabilidade e indefinição dos compostos de fósforo presentes (OLSEN e KHASAWNEH, 1960). Tais limitações têm levado, paulatinamente, ao abandono dessa técnica. Na literatura, entretanto, é ainda muito comum a associação entre teores de fósforo obtidos por extratores e formas de fósforo inorgânico (THOMAS e PEASLEE, 1973; DANIEL FILHO e BRAGA, 1975b; KALPRATH e WATSON, 1960).

No Brasil, o extrator Mehlich 1 ($\text{HCl } 0,05\text{N} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025\text{N}$) é utilizado praticamente em todos os laboratórios de análise de solo na relação 1:10 (solo:extrator). Sua ação consiste na solubilização de fosfatos de cálcio, alumínio e ferro pelos íons hidrogênio presentes. Em solos que contêm esses três fosfatos, a ordem de remoção esperada é fosfatos de cálcio, fosfatos de alumínio, fosfatos de ferro (THOMAS e PEASLEE, 1973). O efeito do sulfato processa-se tanto através do deslocamento do fósforo adsorvido a superfícies dos óxidos hidratados de ferro e alumínio (KAMPRATH e WATSON, 1980) quanto pela eliminação da readsorção do fósforo removido pelos íons hidrogênio (NIELSON et alii, 1953; THOMAS e PEASLEE, 1973; KAMPRATH e WATSON, 1980). Esse extrator é recomendado para solos com baixos valores de CTC, altamente intemperizados, e que contenham pouco ou nenhum fosfato de cálcio (THOMAS e PEASLEE, 1973). Em solos com altos teores de óxido de ferro e de argila, os teores obtidos, normalmente, são baixos, pela exaustão do extrator (THOMAS e PEASLEE, 1973; KAMPRATH e WATSON, 1980).

Outro extrator que se tem mostrado promissor é o Bray 1 (VAN RAIJ, 1970). Consiste na mistura $\text{NH}_4\text{F } 0,03\text{N} + \text{HCl } 0,025\text{N}$ e é empregado na relação 1:10 (solo:extrator). A ação dos íons fluoreto é exercida pela precipitação de cálcio solúvel pelo flúor, extraíndo, assim, o fosfato de cálcio mais solúvel. O flúor é também específico para CaHPO_4 e fosfatos de alumínio, sendo inócua para fosfato básico de cálcio e fosfato de ferro, a não ser que a solução seja acidificada (THOMAS e PEASLEE, 1973). O efeito do íon hidrogênio contido no HCl é o mesmo já discutido para o extrator Mehlich 1. O extrator Bray 1 é indicado para solos que apresentem valores de CTC de baixos a médios e que tenham sofrido de moderada a elevada intemperização, sendo toleradas quantidades razoáveis de fosfatos de cálcio (THOMAS e PEASLEE, 1973).

Os dois extratores (Mehlich 1 e Bray 1) são sensíveis a variações dos teores de argila (PRATT e GARBER, 1964; THOMAS e PEASLEE, 1973; KAMPRATH e WATSON, 1980), sendo necessária, para a utilização de seus níveis críticos, a separação dos solos por classe de textura. O efeito normalmente citado é o de exaustão do extrator por reação com a argila (PRATT e

GARBER, 1964; BALDOVINOS e THOMAS, 1973; KAMPRATH e WATSON, 1980), o que é definido por HOLFORD (1980a) como sensibilidade do extrator à capacidade tampão.

2.2.2. Capacidade Tampão de Fósforo

Já WIKLANDER (1950) estabelecia que a disponibilidade de fósforo para as plantas era determinada pelos fatores intensidade, quantidade e uma taxa que estaria associada à reposição de fósforo, como definido por KHASAWNEH (1971). A idéia de reposição do fator intensidade, quando há remoção ou adição de fósforo em solução, foi também aventada por SCHOFIELD (1955), ao propor o potencial de fosfato monocálcico. A disponibilidade de fósforo para o vegetal, segundo a proposição desse autor, seria determinada pelo potencial químico adequado e pela sua manutenção, quando ocorresse remoção ou adição do nutriente. Conceito semelhante foi estabelecido por BECKETT e WHITE (1964), ao proporem o termo PBC ("potential buffering capacity"), aplicável a relações Q/I (quantidade/intensidade) lineares ou curvilíneas. Na relação linear o PBC seria constante e na curvilínea dependeria do valor de intensidade considerado. Essa dependência motivou a introdução do conceito DPBC ("differential phosphate buffering capacity"), por JENSEN (1970), que indica que a capacidade tampão depende do potencial de fosfato. No entanto, embora a expressão diferencial sugira o cálculo da capacidade tampão em um ponto arbitrário da curva, a fórmula apresentada por JENSEN (1970) indica que esse cálculo deve ser feito em determinada porção da curva, delimitada pelos valores de I a $Q = 0$ e por outro valor escolhido. Essas diferenças de conceituação foram esclarecidas no trabalho de KHASAWNEH (1971), que estabeleceu o termo capacidade tampão para relações Q/I lineares e capacidade tampão diferencial para relações curvilíneas.

Utilizando a isoterma de adsorção de Langmuir para duas superfícies, HOLFORD e MATTINGLY (1976a) propuseram o termo capacidade tampão máxima, que integra a capacidade máxima de adsorção e a energia de reten-

ção. A vantagem do uso desse parâmetro é que, teoricamente, a capacidade tampão torna-se independente da saturação de fósforo. Outro conceito utilizado pelos autores é a capacidade tampão de equilíbrio, estabelecida por BECKETT e WHITE (1964), que é influenciada pelos parâmetros da isoterma de Langmuir e pela saturação de fósforo. Essa dependência torna a capacidade tampão de equilíbrio, que é medida na concentração de fósforo do solo sem adição desse elemento, variável conforme a adubação fosfatada.

Outros pesquisadores têm utilizado índices obtidos de diferentes formas para representar o fator capacidade. Assim, a inclinação máxima da isoterma de Langmuir na faixa de concentração de equilíbrio de 0 a 5 $\mu\text{g P/ml}$ (HOLFORD, 1981), a inclinação da mesma isoterma à concentração de equilíbrio de 10^{-4}M (BACHE e WILLIAMS, 1971) e a quantidade de fósforo adsorvida na concentração de equilíbrio de 0,3 $\mu\text{g P/ml}$ (OZANE e SHAW, 1967), 0,2 $\mu\text{g P/ml}$ (BARROW, 1970) constituem exemplos de índices de capacidade tampão baseados na adsorção de fosfato. À semelhança dos índices anteriores, utiliza-se, ainda, a concentração de equilíbrio em solução, após agitação do solo com quantidade conhecida de fósforo (NOVAIS, 1977; DELAZARI, 1979). Outras formas de representar o fator capacidade compreendem o uso de características de solo relacionadas, direta ou indiretamente, com o fenômeno de adsorção. O teor de argila, o equivalente de unidade, a capacidade de campo, a declividade do aumento de fósforo nos extratores com a adubação fosfatada ou decréscimo com a sua remoção pelo vegetal incluem-se nessa categoria (NOVAIS, 1977; NOVAIS e KAMPATH, 1978; DELAZARI, 1979; FREIRE et alii, 1979; NOVAIS e KAMPATH, 1979b; MIRANDA e VOLKWEISS, 1981).

2.2.3. Capacidade Tampão e Características do Solo

A variação no fator capacidade entre solos está associada, normalmente, a diferenças na adsorção de fosfato. Essas diferenças incluem a natureza e a extensão da superfície disponível para adsorção, bem como o nível de energia com que o íon fosfato está retido. Assim, a associação entre capacidade tampão e características de solo reflete, com maior ou me-

noe ênfase, o efeito isolado ou da interação dos fatores anteriormente mencionados. Esses fatores influenciam não só a adsorção como também a dessorção do fosfato, fazendo com que a histerese entre os dois fenômenos seja mais ou menos pronunciada.

A capacidade tampão relaciona-se com os teores de argila (WEBBER e MATTINGLY, 1970; BAHIA FILHO e BRAGA, 1975a; NOVAIS e KAMPRATH, 1978; MIRANDA e VOLKWEISS, 1981), matéria orgânica (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975a), alumínio (BARROW *et alii*, 1965, BAHIA FILHO e BRAGA, 1975a), fósforo inorgânico (WEBBER e MATTINGLY, 1970), superfície específica (WEBBER e MATTINGLY, 1970; NOVAIS e KAMPRATH, 1978) e conteúdo de CaCO_3 (WEBBER e MATTINGLY, 1970).

Dentre as características mencionadas, o teor de argila é considerado o de maior importância para a determinação do fator capacidade (BAIDOVINS e THOMAS, 1967; WEBBER e MATTINGLY, 1970; BAHIA FILHO e BRAGA, 1975a; NOVAIS e KAMPRATH, 1978; MIRANDA e VOLKWEISS, 1981). Todavia, pouca ênfase tem sido dada ao conhecimento da natureza da fração argila e do efeito da composição mineralógica na capacidade tampão. Embora de caráter genérico, BAHIA FILHO e BRAGA (1975a) sugeriram que a capacidade tampão em Latossolos varia de acordo com a natureza da fração argila, na seguinte ordem: caolinita < gibbsita < material amorfo.

2.2.4. Absorção de Fósforo e Adubação Fosfatada, em relação aos Fatores Intensidade, Quantidade e Capacidade Tampão

Tanto a absorção quanto a quantidade de fósforo para crescimento ótimo são, teoricamente, descritas com maior precisão quando se considera a associação de dois dos três fatores que interferem na disponibilidade do nutriente.

Tal princípio não estabelece, no entanto, a relação funcional entre os parâmetros citados. Nem sempre a relação é simples, como no caso do trabalho de BARROW (1967), em que a absorção de fósforo foi descrita por um modelo que incluía o tempo de absorção, o fator intensidade (potencial

de fosfato monocálcico) e a capacidade tampão. A função era, no entanto, não-linear, sendo o efeito das três variáveis considerado de caráter multiplicativo. O modelo proposto explicou 90% da variação da absorção de fósforo em 42 solos da Austrália.

Efeitos contrários da capacidade tampão na dose ótima de fertilizante fosfatado foram obtidos por SALMON (1973), quando considerou experimentos em casa de vegetação e de campo. No primeiro caso, a capacidade tampão fez decrescer a solubilidade do fertilizante adicionado, ao passo que, no campo, o efeito principal foi a manutenção de nível adequado de fósforo em solução. Tal diferença torna perigoso, segundo o autor, relacionar os efeitos do fator capacidade em experimentos de campo e em casa de vegetação. Nos dois casos, contudo, os fatores intensidade e capacidade explicaram a maior parte das variações observadas na dose ótima de fertilizante.

As equações propostas por OLSEN e WATANABE (1963) e NYE (1966) indicam que a absorção de fósforo deve aumentar na proporção da raiz quadrada da capacidade tampão. Quando se consideram os outros dois fatores (intensidade e quantidade), a situação pode ser modificada. Para KHASAWNEH, (1971), deveriam ser consideradas duas situações, pressupondo relações lineares entre Q (quantidade) e I (intensidade):

1. Para dois solos de mesmo I, a absorção será maior naquele com maior fator capacidade (maior Q);
2. Para dois solos de mesmo Q, a absorção será maior naquele com menor fator capacidade (maior I).

Essas relações foram verificadas experimentalmente por HOLFORD e MATTINGLY (1976b), que utilizaram a capacidade tampão máxima e a capacidade de equilíbrio como índices do fator capacidade. Considerando o fator quantidade, sua disponibilidade ou facilidade de dessorção é inversamente relacionada com a energia de retenção da isoterma de Langmuir e com a capacidade tampão. Conseqüentemente, há relação direta entre nível crítico de fósforo lábil e capacidade tampão.

Considerando o fator intensidade (fósforo em solução), a resistência à sua mudança é diretamente relacionada com a capacidade de adsorção e com a capacidade tampão. Dessa forma, o nível crítico para I é inversamente proporcional à capacidade tampão.

O efeito teórico da capacidade tampão sobre a quantidade de fertilizante que se deve aplicar não é muito claro. Para HOLFORD (1976), há duas situações:

1. Em dois ou mais solos de igual intensidade (I), aumentos na capacidade tampão estão associados com aumentos no fósforo lábil; conseqüentemente, serão necessárias menores quantidades de fósforo. Por outro lado, quanto maior for a capacidade tampão, maior quantidade de fósforo será adsorvida por unidade de acréscimo de I, de forma que maior quantidade de fertilizante será necessária. Assim, o efeito da capacidade tampão será positivo ou negativo, dependendo do balanço dos dois efeitos opostos.

Um predomínio do efeito de adsorção acarreta maior necessidade de adubação fosfatada, à semelhança dos resultados encontrados por SALMON (1973) e BAHIA FILHO e BRAGA (1975c).

2. Em dois ou mais solos de igual fator quantidade, um aumento na capacidade tampão teria efeito positivo na quantidade de fósforo que deveria ser adicionada, tendo em vista a ação negativa dessa capacidade na disponibilidade (facilidade de dessorção) tanto do fósforo lábil quanto do fósforo proveniente do fertilizante.

Apesar do pequeno volume de informações, fica claro que, para predição da quantidade de fertilizante que se deve utilizar, é necessário o emprego de medidas de intensidade ou de quantidade associadas com a capacidade tampão. Concordam com esse princípio os trabalhos de NOVALIS e KAMPRATH (1978, 1979a, b) e de FREIRE *et alii* (1979).

Quando a estimativa do fator quantidade é obtida pelo uso de extratores, como no caso desses trabalhos (NOVALIS e KAMPRATH, 1978, 1979a, b), deve-se considerar ainda outra variável, que é a sensibilidade do extrator à capacidade tampão. Essa sensibilidade determina diferenças de ní-

vel crítico entre solos arenosos e argilosos, atribuídas, em alguns casos, à exaustão do extrator pela argila. Essa exaustão, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1, pode ser atribuída ao consumo de hidrogênio na protonação da superfície de óxidos hidratados de ferro e alumínio, adsorção do sulfato, reação com argila, adsorção de hidrogênio ou readsorção do fósforo extraído (PRATT e GARBER, 1964; BALDOVINOS e THOMAS, 1967; THOMAS e PEASLEE, 1973; KAMPFRATH e WATSON, 1980).

Não está claro, entretanto, se a exaustão está inteiramente compreendida na sensibilidade à capacidade tampão aventada por HOLFORD e MATTINGLY (1979). O extrator sensível é aquele em que a proporção do fósforo lábil extraída varia inversamente à capacidade tampão. O extrator reflete, assim, a variação da disponibilidade de fósforo para o vegetal, tanto no aspecto do fósforo lábil quanto, parcialmente, no aspecto de capacidade tampão. As melhores correlações entre absorção de fósforo e teores de fósforo disponível são encontradas com o uso de extratores sensíveis (HOLFORD e MATTINGLY, 1979; HOLFORD, 1980a, b). Dentre os extratores testados por HOLFORD e MATTINGLY (1979) e HOLFORD (1980a, b), o Bray 1 e o Bray 2 comportaram-se como sensíveis, quando comparados com os extratores de Colwell e Olsen.

A introdução do conceito de sensibilidade no uso de extratores constitui, segundo HOLFORD e MATTINGLY (1979) e HOLFORD (1980a), a base físico-química para a avaliação da disponibilidade de fósforo por esses métodos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Seleção do Material de Solos

O material de solos empregado foi selecionado a partir de dados analíticos de 39 perfis, descritos pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo - EMBRAPA e pela EPAMIG, nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais. Para a seleção, consideraram-se os dados de análise granulométrica e ataque sulfúrico do horizonte B₂₁ para os Latossolos e C₂ para as Areias Quartzosas. Os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e TiO₂ constituíram os elementos para estimativa da composição mineralógica do solo e da fração argila, pelo método de alocação descrito por RESENDE (1976). Feita a análise, em conjunto, dos dados referidos, foram escolhidos 8 perfis, variáveis em textura e mineralogia (Quadro 2). Procurou-se amostrar os solos escolhidos o mais próximo possível do local da descrição do perfil, seguindo-se as indicações de localização das unidades escolhidas constantes da ficha descritiva. A amostragem foi efetuada até a profundidade de 0,20 m, aproximadamente, sendo o material coletado secado ao ar, passado em peneira de malha de 2 mm e homogeneizado antes de qualquer utilização. Os materiais coletados provieram, predominantemente, de Latossolos, cuja vegetação engloba desde campo tropical e cerrado a floresta, em relevo plano a suave ondulado.

QUADRO 2 - Classificação, identificação e procedência das amostras de material de solo utilizadas*

Classe de solo	Símbolo	Identificação	Altitude (m)	Município do Estado de Minas Gerais
. Areia Quartzosa distrófica A moderado fase cerrado	AQd	TM-5	590	Campina Verde
. Latossolo Vermelho Escuro distrófico A moderado textura média fase cerrado subperenifólio relevo plano e suave ondulado	LEdm	TM-6	380	Ituiutaba
. Latossolo Vermelho Escuro distrófico A moderado textura média fase cerrado subcaducifólio relevo plano	LEdm	TM-18	480	Campina Verde
. Latossolo Vermelho Escuro epieutrófico A proeminente textura argilosa fase floresta tropical subcaducifólio relevo plano	LEdr	TM-42	390	Iturama
. Latossolo Vermelho Escuro distrófico A moderado textura argilosa fase floresta subperenifólio relevo suave ondulado	LEdr	TM-14	710	Douradoquara
. Latossolo Vermelho Escuro distrófico A moderado textura muito argilosa fase floresta tropical subperenifólio relevo suave ondulado	LEdr	AP-C13	1040	Patos de Minas
. Latossolo Vermelho Amarelo distrófico epiálico podzóico plúntico A moderado textura muito argilosa fase campo tropical relevo plano (com sarundus)	LVar	TM-56	970	Uberaba
. Latossolo Vermelho Amarelo álico A moderado textura muito argilosa fase cerrado tropical subcaducifólio relevo plano	LVar	TM-67	900	Uberaba

* A classificação e identificação utilizadas foram as mesmas originalmente empregadas na descrição dos perfis.

3.2. Caracterização Química e Física

As amostras secadas ao ar e peneiradas (2 mm) foram submetidas a análises químicas e físicas, segundo os métodos usados no Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (EMBRAPA, 1979). As análises químicas incluíram a determinação de pH em H_2O e KCl, cátions trocáveis (H^+ , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), carbono orgânico e óxidos totais, pelo ataque sulfúrico (dens. de 1,47) (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5). Os valores de soma de bases (S), capacidade de troca de cátions (T) e saturação de bases (V) foram obtidos por meio de cálculos, que envolveram os dados de cátions trocáveis (Quadros 1A e 2A, Apêndice). As análises físicas compreenderam a determinação da composição granulométrica, pelo método da pipeta, do equivalente de unidade e da curva característica de retenção de unidade (Quadros 2A e 3A).

3.3. Caracterização Mineralógica

3.3.1. Difração de Raios X da Fração Argila

3.3.1.1. Obtenção da argila total e da argila fina. Aproximadamente 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA) foram dispersos pela adição de 100 ml de NaOH 0,1N, seguida de agitação e repouso durante 24 horas. Depois disso, procedeu-se à agitação, em coqueteleira, durante 15 minutos. A suspensão obtida foi passada em peneira com malha de 0,053 mm ($n.^o$ 270), separando-se a fração areia (EMBRAPA, 1979). As frações remanescentes (silte e argila) foram colocadas em recipientes, completando-se o volume, para atingir dois litros. A separação das frações argila total ($<2 \mu m$) e argila fina ($<0,2 \mu m$) foi efetuada mediante sifonamento. O material coletado foi submetido a diálise, para remoção do excesso de sais, e, posteriormente, secado ao ar.

3.3.1.2. Amostra orientada. Na fração argila total, procedeu-se à remoção

de matéria orgânica e ferro, segundo a metodologia descrita por JACKSON (1973). Feitos esses tratamentos, a argila foi saturada com cálcio, lavada com etanol e acetona, para remoção de sais, e ressuspensa em água destilada. Determinou-se, nas suspensões obtidas, a concentração de sólidos. Com base nessa informação, prepararam-se novas suspensões com 50 mg de argila/ml, das quais se tomaram 2 ml, que foram colocados em lâminas de vidro e secados ao ar.

3.3.1.3. Amostra em pó. Na fração argila fina ($< 0,2 \mu\text{m}$), procedeu-se à concentração dos óxidos de ferro, mediante a eliminação dos silicatos e da gibbsita por fervura com NaOH 5M, durante 60 minutos (NORRISH e TAYLOR, 1961). Lavado o material com HCl 0,5M, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ e água destilada, com posterior centrifugação, foi efetuada a secagem, em estufa, a 110°C , durante 12 horas. O material obtido foi moído em almofariz e analisado, na forma de pó, por difração de raios X.

Nos dois casos (amostras orientadas e amostras em pó), a análise foi realizada em difratômetro com radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$) e filtro de níquel com velocidade de exposição de 1° por minuto.

3.3.2. Composição Mineralógica

A composição mineralógica do material de solo e da fração argila foi calculada a partir dos dados analíticos de óxidos totais obtidos pelo ataque sulfúrico (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2), segundo a metodologia proposta por RESENDE (1976).

Para a aplicação do método, admite-se que: (a) não haja material amorfo no solo (SiO_2 e Al_2O_3) ou que seja muito baixo; (b) não haja outra argila silicatada, a não ser caolinita, ou manifeste-se em quantidade diminuta; (c) todo o SiO_2 removido pertença à caolinita e o quartzo não seja atacado.

Considerou-se ainda que a goethita presente nos materiais estudados continha 30 mol % de substituição de Fe por Al (RESENDE, 1976) e a

hematita 5 mol %. A distribuição do Fe_2O_3 presente foi efetuada admitindo: (a) presença de três formas ferruginosas apenas, no solo: hematita (Hm), goethita (Go) e ilmenita (Il); (b) ilmenita somente na fração areia ou silte, e anatásio (An) na fração argila.

Para determinação da % de hematita e goethita presentes, aplicaram-se as seguintes relações:

$$\% \text{ de Hm} = \frac{R}{\frac{A_{\text{Go}}}{A_{\text{Hm}}} \cdot 0,9845 + 0,9675}$$

$$\% \text{ de Go} = \frac{R}{\frac{A_{\text{Hm}}}{A_{\text{Go}}} \cdot 0,6850 + 0,6970}$$

% de Hm = porcentagem de hematita no material de solo

% de Go = porcentagem de goethita no material de solo

R = teor de Fe_2O_3 que deve ser alocado para hematita e goethita

A_{Go} = área do pico da goethita (110), no espaçamento de $4,18\text{\AA}$

A_{Hm} = área do pico da hematita (104), no espaçamento de $2,69\text{\AA}$

A área dos picos foi calculada a partir de mensurações efetuadas com paquímetro nos difratogramas, considerando sua forma triangular (Quadro 4A). A dedução das fórmulas empregadas na alocação de hematita e goethita, bem como das demais fórmulas para estimar caolinita e gibbsita, encontram-se nos Apêndices 7.1 e 7.2.

A composição mineralógica da fração argila foi obtida com base na relação percentual entre cada componente e a soma dos componentes presentes no material de solo.

3.4. Índices de Disponibilidade de Fósforo

3.4.1. Isotermas de Adsorção

Uma amostra de 2,5 g de terra seca ao ar (TFSA) foi agitada, à temperatura ambiente, com 25 ml de CaCl_2 0,01M, com concentrações crescentes de fósforo, na forma de KH_2PO_4 , durante 24 horas, em agitador vertical rotativo tipo Wagner. Em estudo preliminar, foram estabelecidos 9 níveis de fósforo de 2 a 40 $\mu\text{g P/ml}$, para os materiais TM-5, TM-6, TM-18, TM-42, e de 4 a 120 $\mu\text{g P/ml}$, para os materiais TM-14, TM-56, AP-C13 e TM-67.

Adicionaram-se duas gotas de tolueno a cada tubo, antes da agitação, para prevenir a atividade microbiana. Feita a agitação, as suspensões foram centrifugadas e filtradas, determinando-se o fósforo pelo método da Vitamina C, modificado por BRAGA e DEFELIPO (1974).

Considerou-se fósforo adsorvido a diferença entre a concentração inicial adicionada e a de equilíbrio, após o período de agitação. Os dados de concentração de fósforo em equilíbrio, em $\mu\text{g P/ml}$, e fósforo adsorvido ($\mu\text{g P/g}$) foram ajustados à isoterma de Langmuir, na sua forma hiperbólica, com o uso do programa REGRENIL, de BARD (1974), utilizando o método de Gauss-Newton. A equação da isoterma de Langmuir utilizada foi a de uma única superfície de adsorção.

3.4.2. Intensidade

Uma amostra de 2,5 g de terra fina seca ao ar (TFSA) foi agitada com 25 ml de CaCl_2 0,01M, nas mesmas condições descritas no item anterior. O fósforo em solução, determinado pelo método referido em 3.4.1., constituiu o fator intensidade, expresso em $\mu\text{g P/ml}$.

3.4.3. Quantidade

Considerou-se estimativa do fator quantidade o fósforo adsorvido em equilíbrio com o fósforo em solução (HOLFORD e MATTINGLY, 1976a). Para obter esse fator, empregaram-se as concentrações de equilíbrio das amostras adubadas nas isotermas de adsorção determinadas nas amostras com calagem.

3.4.4. Fósforo Disponível

Os teores de fósforo disponível foram obtidos utilizando os extratores Mehlich 1 e Bray 1, por meio dos seguintes procedimentos: (a) extrator Mehlich 1 ($\text{HCl } 0,05\text{N} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,025\text{N}$): 5 gramas de terra fina seca ao ar (TFSA) foram agitados durante 5 minutos, com 50 ml do extrator, filtrando-se em seguida (VETTORI, 1969); (b) extrator Bray 1 ($\text{NH}_4\text{F } 0,03\text{N} + \text{HCl } 0,025\text{N}$): 5 gramas de terra fina seca ao ar (TFSA) foram agitados durante 1 minuto, com 50 ml do extrator, filtrando-se em seguida (BRAY, 1947). Nos extratos obtidos, determinou-se o fósforo, pelo método citado no item 3.4.1., com os resultados expressos em $\mu\text{g P/g}$.

3.4.5. Capacidade Tampão

Os índices utilizados de capacidade tampão foram derivados dos dados obtidos das isotermas de adsorção (item 3.4.1.):

a. Capacidade tampão máxima. (HOLFORD e MATTINGLY (1976). Inclinação máxima da isoterma de Langmuir para uma única superfície de adsorção, dada pela expressão

$$\left(\frac{dx}{dc} \right)_{c \rightarrow 0} = k x_m$$

b. Capacidade tampão de equilíbrio. (BECKETT e WHITE, 1964, e

HOLFORD e MATTINGLY, 1976a). Valor da tangente à isoterma de Langmuir para uma única superfície de adsorção na concentração natural de equilíbrio (quando o fósforo adicionado é igual a zero). É obtido pela primeira derivada da equação da isoterma de Langmuir, na sua forma original:

$$\frac{dx}{dc} = \frac{kx_{\infty}}{(1 + kc)^2}$$

c. Índice tampão. (HOLFORD, 1979). Inclinação máxima da isoterma de Langmuir para uma única superfície de adsorção, determinada na faixa de fósforo adicionado de 0 a 10 $\mu\text{g P/ml}$, para os materiais de solo arenosos e de textura média, e de 0 a 40 $\mu\text{g P/ml}$, para os argilosos. A escolha dessas faixas foi baseada na observação da distribuição de pontos em duas populações, na transformação linear da isoterma de Langmuir, para os materiais de solo com calagem e sem adubação fosfatada.

d. Índice de adsorção (OZANNE e SHAW, 1968). Quantidade de fósforo adsorvida, a uma concentração de equilíbrio de 0,3 $\mu\text{g P/ml}$.

3.5. Ensaio em Casa de Vegetação

3.5.1. Ensaio Preliminar

Este ensaio foi conduzido com o objetivo de obter os dados para a justar regressões para fósforo recuperado pelo extrator Mehlich 1 e fósforo adicionado. Essas equações foram utilizadas para estabelecer os níveis de fósforo no ensaio de exaustão (item 3.5.3.).

Foram utilizadas amostras de 250 g de terra fina seca ao ar (TFSA), as quais receberam 0, 100, 150 e 200 $\mu\text{g P/g}$ de TFSA, na forma de $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Adicionalmente, aplicaram-se 250 $\mu\text{g P/g}$ de TFSA a amostras de 750 g de material de solo. A aplicação foi efetuada na forma de solução, distribuída gota a gota sobre o material de solo espalhado em camada

fina. As amostras foram homogeneizadas, colocadas em recipientes plásticos, recebendo água desmineralizada em quantidade suficiente para elevar o teor de unidade a 100% da água retida a 1/3 de bar (Quadro 3A). Procurou-se manter essa unidade por meio de adição diária de água desmineralizada, mediante controle feito por pesagem, até o 12.^o dia de incubação. No tratamento em que se aplicaram 250 µg P/g de TFSA, efetuaram-se amostragens de material, para determinação de fósforo, pelo extrator Mehlich. As amostragens foram iniciadas 48 horas após o início da incubação, continuando, diariamente, até o 6.^o dia, e de três em três dias, até o 12.^o dia. Feita a coleta, o material foi secado em estufa, a 40°C, e analisado, quanto ao teor de fósforo, pelo método citado em 3.4.1. Os resultados obtidos (Quadro 5A) mostraram pequena variação nos teores de fósforo disponível no período de incubação considerado. Com os dados obtidos foram ajustadas equações de regressão entre fósforo disponível, pelo extrator Mehlich 1, e fósforo aplicado (Quadro 6A).

3.5.2. Curvas de Incubação e Correção dos Materiais de Solo

As curvas de incubação foram obtidas com a finalidade de estabelecer a quantidade de corretivo que deveria ser aplicada para elevar o pH do material de solo para 6,5.

Adicionou-se a amostras de 100 g de terra fina seca ao ar (TFSA) uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 , na proporção de 4:1, em equivalente, suficiente para neutralizar 0,00, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,50 e 2,00 vezes a acidez trocável ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), extraída por acetato de cálcio. Colocou-se água desmineralizada em quantidade suficiente para elevar o teor de unidade a 100% da água retida a 1/3 de bar (Quadro 3A). Durante a incubação, procurou-se manter esse nível de unidade pela adição de água desmineralizada, mediante controle feito por pesagem. Efetuaram-se leituras de pH aos 7, 15 e 30 dias após a adição do material corretivo. Aos 15 dias verificou-se constância dos valores de pH. Ajustaram-se equações de regressão entre pH e níveis de correção de acidez trocável (Quadro 7A). Com base nessas equações,

estimaram-se os níveis de correção da acidez trocável e a quantidade de corretivo que deveria ser adicionada (mistura de CaCO_3 e MgCO_3 já mencionada) para elevar o pH a 6,5 (Quadro 8A). Foram pesados 33 kg de cada material de solo, que foram misturados com as respectivas quantidades de corretivo calculadas, colocados em sacos plásticos, irrigados com água desmineralizada, da mesma forma anteriormente descrita, e fechados. A incubação foi realizada durante 20 dias. Depois, as amostras foram secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de abertura e analisadas (Quadro 9A).

3.5.3. Ensaio de Exaustão das Concentrações de Fósforo Adicionadas

Com base nas equações de fósforo disponível e fósforo aplicado (Quadro 6A), foram estimadas as quantidades de fósforo que deveriam ser adicionadas para que fossem obtidos quatro teores de fósforo disponível em cada material de solo, de tal magnitude que abrangessem seu nível crítico e permitissem cultivos sucessivos (Quadro 10A). Como orientação, utilizaram-se as relações entre teor de argila e nível crítico estabelecidas por FREIRE et alii (1979).

Para aplicar o fertilizante fosfatado ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), empregou-se a mesma metodologia descrita no item 3.5.1. A incorporação foi efetuada em porções de 2 kg de material de solo, e cada dosagem foi colocada em três repetições. Na mesma ocasião, efetuou-se a incorporação do fertilizante fosfatado, nas suas quatro doses, em porções de 1 kg de material de solo, sem repetição. As amostras assim adubadas foram acondicionadas em vasos plásticos. Cada vaso, com 2 kg de material de solo, recebeu, na ocasião, 100 ml de uma solução nutritiva que continha todos os nutrientes, à exceção de fósforo (Quadro 11A). Os vasos foram irrigados, procurando-se atingir o teor de umidade correspondente a 80% da água retida a 1/3 de bar, para TM-5, TM-6, TM-18, TM-42, e a 1/10 de bar, para TM-14, TM-56, AP-C13 e TM-67, conforme recomendação de FERNANDES et alii (1978). Decorridos três dias desses tratamentos, foi efetuado o plantio, utilizando o milho (Pennisetum typhoides, cv. CMS XII 1) como planta indicadora. Os tratamentos foram dis-

postos no delineamento inteiramente casualizado, promovendo-se, semanalmente, a rotação dos vasos, para melhor casualização.

Cerca de uma semana após o plantio efetuou-se o desbaste, deixando 25 plantas por vaso. Durante o período experimental, foi efetuado o controle dos níveis de umidade, estabelecidos mediante pesagem diária. Feito o desbaste, de cinco em cinco dias aplicaram-se 50 $\mu\text{g N/g}$ de TFSA, na forma de NH_4NO_3 . Até o final do experimento foram aplicados, por vaso, 600 mg de N, 200 mg de K, 64 mg de S, 1,60 mg de B, 2,46 mg de Mn, 0,30 mg de Mo, 3,12 mg de Fe, 2,66 mg de Cu e 8,00 mg de Zn.

A colheita foi realizada 22 dias após o plantio, cortando-se o material vegetal rente ao solo e acondicionando-o em sacos de papel. O material colhido foi secado em estufa com ventilação forçada, a 75°C , durante 96 horas, pesado e moído em moinho tipo Wiley.

Os vasos que continham 1 kg de material de solo receberam apenas a adubação fosfatada e não foram plantados, mas irrigados segundo o mesmo critério aplicado aos demais vasos.

Foram realizados mais quatro cultivos, utilizando, em linhas gerais, a mesma metodologia do primeiro ensaio, com algumas alterações (Quadro 12A).

Após cada cultivo, o material dos vasos foi retirado e as raízes foram cortadas em pequenos pedaços e incorporadas uniformemente ao material de solo. De cada vaso foi retirada uma amostra de 100 g, para as análises químicas necessárias. A mesma amostragem foi efetuada nos vasos sem planta após o primeiro cultivo. Após o segundo cultivo foram adicionados CaCO_3 e MgCO_3 em quantidades suficientes para elevar o nível de cálcio mais magnésio para 3,0 e 4,0 meq/100 g, nos materiais de solo TM-5, TM-6, TM-18, TM-42 e TM-14, TM-56, AP-C13, TM-67. Procurou-se manter a relação $\text{CaCO}_3:\text{MgCO}_3$ na proporção de 4:1, em equivalente, anteriormente estabelecida. Feita a correção, adicionou-se água desmineralizada, para remover o excesso de sódio adicionado, juntamente com o fósforo, em quantidade equivalente a duas vezes o espaço poroso. A água percolada foi analisada, quanto ao teor de fósforo, calculando-se a quantidade removida desse nutriente

(Quadro 13A). A quantidade de fósforo removida pela percolação foi adicionada à removida pelo vegetal no terceiro cultivo, o que representou o fósforo extraído.

Em todos os cálculos, considerou-se um hectare correspondente a 2.000 toneladas de material de solo.

3.6. Análises de Material Vegetal

O material vegetal moído foi submetido a digestão em mistura nítrico-perclórica, determinando-se o fósforo presente no extrato pela metodologia proposta por LOTT et alii (1956).

3.7. Determinação de Níveis Críticos

Para determinar os níveis críticos ajustaram-se equações de regressão entre produção relativa (Y) e o inverso dos teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 (X). O nível crítico foi obtido aplicando-se à equação ajustada o valor de produção relativa de 80%. As produções relativas foram calculadas tomando 100% como produção máxima de matéria seca estimada obtida da regressão ajustada entre produção de matéria seca (Y) e o inverso do teor de fósforo disponível, pelos extratores u tilizados.

Utilizaram-se os dados coletados nos cinco cultivos realizados, exceto nos casos em que o coeficiente de determinação da regressão ajustada não foi significativo, pelo menos ao nível de 5%, pelo teste de F.

3.8. Análises Estatísticas

As análises de variância, regressão e correlação foram realizadas na Central de Processamento de Dados da Universidade Federal de Viçosa. Foram efetuadas análises conjuntas de variância dos dados obtidos nos experi

mentos realizados em casa de vegetação, verificando-se a homogeneidade das variâncias pelo teste de Cochran (COSTA NETO, 1977).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fatores Capacidade, Intensidade e Quantidade, em relação aos Componentes e às Característi - cas do Solo

4.1.1. Mineralogia da Fração Argila

Os resultados da difração de raios X e da composição mineralógica pelo método de alocação (Figuras 1 e 2 e Quadros 3 e 4) mostraram que o mineral dominante na fração argila das amostras TM-5, TM-6, TM-18 e TM-42 era a caolinita e nos materiais TM-14, TM-56, AP-C13 e TM-57, a caolinita e a gibbsita.

A tendência genérica é a ocorrência dos solos caoliníticos nas posições rebaixadas da paisagem, ao passo que os gibbsíticos, nas partes mais elevadas, ocupam o teto da paisagem (Quadro 2).

A variabilidade na mineralogia dos materiais considerados coloca em dúvida a idéia de que nos Latossolos a homogeneidade seja a característica predominante. Dessa forma, para teores de argila bem próximos, podem-se verificar diferenças muito pronunciadas de composição mineralógica, como entre TM-42 e TM-14 e entre TM-56, AP-C13 e TM-57 (Quadros 3 e 4). Na amostra TM-56, a gibbsita é o mineral dominante, contribuindo com 55% da fração argila (Quadro 4). Analisando material semelhante, SUGUIO et alii (1976) encontraram teores bastante próximos desse valor (51 a 54% de gibbsita). Dentre os minerais ferruginosos, a hematita predominou nas classes

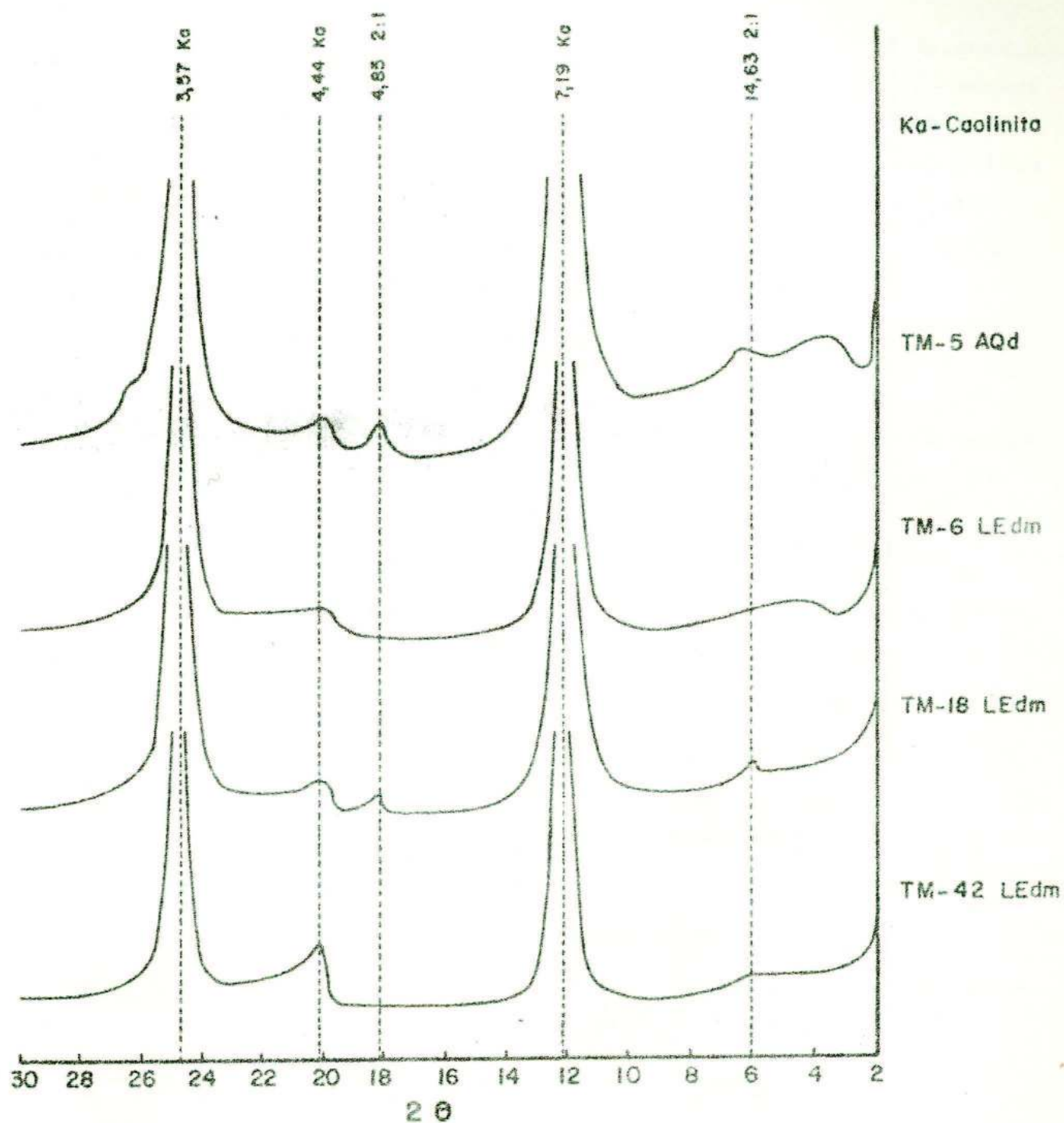


FIGURA 1 - Difractogramas de lâminas da fração argila, em montagem orientada, dos materiais de solo TM-5, TM-6, TM-18 e TM-42.

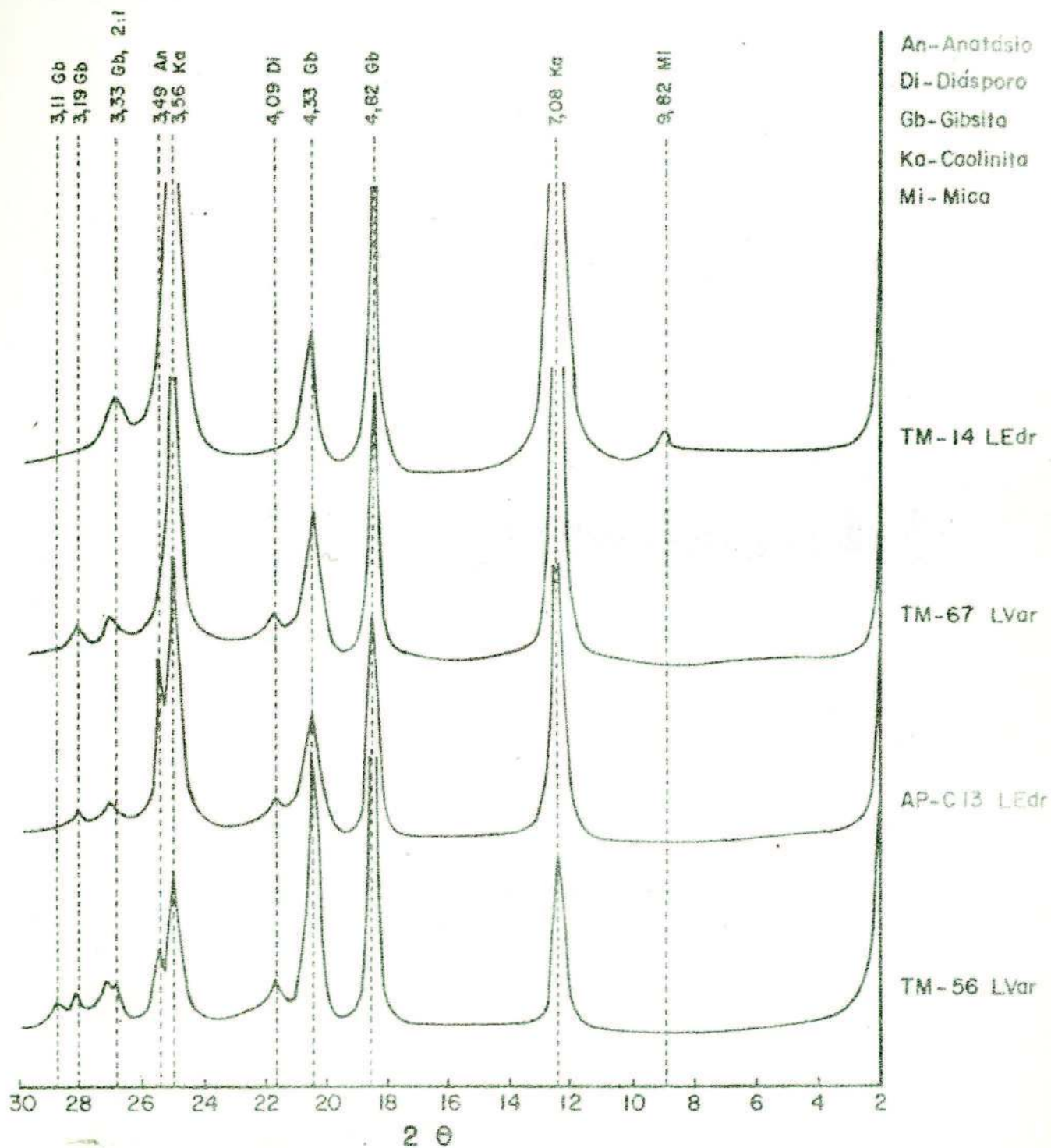


FIGURA 2 - Difrátogramas de lâminas da fração argila, em montagem orientada, dos materiais de solo TM-14, TM-67, AP-C13 e TM-56.

QUADRO 3 - Composição mineralógica das amostras de material de solo, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico

Classe de solo	Identificação	Composição mineralógica			
		Caolinita	Hematita	Goethita	Gibbsita
		%			
AQd	TM-5	5,68	2,86	0,64	-
LEdm	TM-6	7,18	2,91	0,68	-
LEdm	TM-18	10,20	6,40	1,54	-
LEdr	TM-42	23,71	5,83	1,02	-
LEdr	TM-14	19,84	8,48	2,95	8,55
LVar	TM-56	14,75	-	17,44	41,15
LEdr	AP-C13	25,59	-	21,49	19,29
LVar	TM-67	34,92	-	16,59	25,12

QUADRO 4 - Composição mineralógica da fração argila, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico das amostras de material de solo

Classe de solo	Identificação	Composição mineralógica			
		Caolinita	Hematita	Goethita	Gibbsita
		%			
AQd	TM-5	54	27	6	-
LEdm	TM-6	54	22	5	-
LEdm	TM-18	49	31	7	-
LEdr	TM-42	72	18	3	-
LEdr	TM-14	47	20	7	20
LVar	TM-56	20	-	23	55
LEdr	AP-C13	37	-	31	28
LVar	TM-57	45	-	21	32

de solo AQd, LE_{dm}, LE_{dr} (TM-5, TM-6, TM-18, TM-42 e TM-14) e a goethita nos materiais de coloração mais amarelada (TM-56 e TM-57) e no AP-C13. Nesse último, embora pertença à classe de solo LE_{dr}, não foi verificada a presença de hematita na fração argila muito fina. Provavelmente, esse mineral ferruginoso se encontra finamente dividido em cristais de tamanho reduzido, não detectáveis pelo raio X. Além da caolinita, hematita, goethita e gibbsita, verificou-se a ocorrência de mineral 2:1 (TM-5 e TM-18), mica (TM-14), diásporo (TM-57, AP-C13 e TM-56) e anatásio (TM-56). Mineral 2:1 em material de solo muito semelhante ao utilizado neste estudo foi também identificado por SANTANA (1973) como vermiculita. Nesse caso, é possível que esse mineral de argila ocorra com ilhas de hidróxido de alumínio, o que lhe confere elevada resistência ao intemperismo (ALMEIDA, 1979). Na alocação do Al_2O_3 pelo ataque sulfúrico, pelo menos em um caso de ocorrência de argila 2:1 (TM-5), deve-se considerar que o alumínio restante, após o cálculo da caolinita, não pertence à gibbsita (que não foi verificada no raio X), mas, provavelmente, às referidas ilhas de hidróxido de alumínio.

Uma das pressuposições do método de alocação é que o quartzo não seja atacado e toda a sílica pertença à caolinita. A correlação entre soma de óxidos e conteúdo de argila, principalmente em solos ricos em areia fina, sustentaria essa pressuposição (RESENDE, 1976). O ajustamento entre os dados do total da composição mineralógica (Y) e o conteúdo de argila (X) constitui evidência de que o ataque sulfúrico atua principalmente sobre a fração argila ($Y = 4,51 + 1,02X$ $R^2 = 0,986^{**}$).

4.1.2. Capacidade Tampão e Componentes do Solo

A avaliação da disponibilidade de fósforo nas amostras de material de solo utilizadas evidenciou valores extremamente reduzidos de fósforo em solução, baixos teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e considerável variação nos parâmetros de energia e capacidade máxima de adsorção (Quadro 5). Pela sua magnitude, os teores de fósforo em solução devem ser vistos com reserva, por causa da imprecisão do

QUADRO 5 - Parâmetros de disponibilidade de fósforo nas amostras de material de solo utilizadas

Classe de solo	Identificação	Intensidade	Fósforo disponível		Energia de adsorção (K)	Capacidade máxima de adsorção (x_m)	Capacidade tampão	
			Mehlich 1	Bray 1			Máxima	Equilíbrio
		($\mu\text{g/ml}$). 10^2	$\mu\text{g/g}$		ml/ μg	$\mu\text{g/g}$	ml/g	
AQd	TM-5	0,9	3,3	4,6	1,69	205	346	336
LEdm	TM-6	1,6	8,8	11,2	0,43	180	76	76
LEdm	TM-18	1,6	2,2	7,3	0,76	270	205	200
LEdr	TM-42	1,9	8,0	6,6	0,34	238	81	80
LEdr	TM-14	1,5	0,9	1,3	0,49	953	467	450
LVar	TM-56	0,6	0,7	2,5	1,74	1321	2299	2261
LEdr	AP-C13	1,5	5,1	6,4	2,40	1502	3605	3359
LVar	TM-67	0,6	0,8	2,0	2,02	1097	2216	2163

método de determinação na faixa de concentração em que se situam. No entanto, caracterizam a mesma situação verificada por BAHIA FILHO e BRAGA (1975a) em Latossolos com valores do fator intensidade uniformemente baixos.

A comparação dos resultados de capacidade tampão máxima e de equilíbrio mostra que há bastante similaridade entre eles. A razão dessa semelhança reside no fato de que a capacidade tampão de equilíbrio é medida na concentração de equilíbrio de fósforo. Como essa concentração aproxima-se de zero, tem-se, praticamente, os mesmos resultados da capacidade tampão máxima. As maiores discrepâncias são verificadas justamente onde ocorre maior teor de fósforo em solução, associado com elevada energia e capacidade máxima de adsorção (AP-C13). Assim, os índices de capacidade tampão calculados segundo os conceitos de BECKETT e WHITE (1964) e HOLFORD e MATTINGLY (1976a) somente deverão apresentar resultados diferentes se os teores de fósforo em solução forem significativamente maiores que zero e em solos com altos valores de energia e capacidade máxima de adsorção. No caso presente, as estimativas de capacidade tampão estão estreitamente correlacionadas entre si ($r = 0,999^{**}$).

Uma vez que a capacidade tampão está associada à adsorção de fosfato, procurou-se relacioná-la com algumas características do solo ligadas ao fenômeno de retenção (Quadro 6). As correlações encontradas refletem, direta ou indiretamente, o relacionamento, anteriormente referido, entre o fator capacidade e a adsorção. Dentre os parâmetros da capacidade tampão, a adsorção máxima foi o que se associou em maior grau com as características selecionadas. Assim, todos os parâmetros avaliados estão relacionados, principalmente, com fenômenos de superfície. As correlações entre capacidade tampão, adsorção máxima e energia de adsorção eram esperadas, tendo em vista a participação desses parâmetros na obtenção do fator capacidade. O relacionamento com o teor de carbono indica a participação positiva da matéria orgânica na adsorção de fosfato. Essa participação, no entanto, diante do caráter aniônico da matéria orgânica, pode processar-se, possivelmente, através de "pontes" de cátions metálicos (Fe ou Al) entre a matéria orgânica e o ânion fosfato (WILD, 1950; BRAGA, 1973; FOX, 1979; SAMPLE *et alii*, 1980).

QUADRO 6 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre a capacidade tampão máxima, os parâmetros da isoterma de Langmuir e algumas características do solo

Característica	Capacidade tampão máxima	Adsorção máxima	Energia de adsorção
Adsorção máxima (x_m)	0,911**	-	-
Energia de adsorção (k)	0,866**	0,587 n.s.	-
Conteúdo de argila	0,900**	0,937**	0,587 n.s.
Teor de carbono	0,843**	0,771*	0,568 n.s.
Equivalente de unidade	0,884**	0,952**	0,624 n.s.
Água retida a -1/3 bar	0,895**	0,955**	0,632 n.s.
P em solução (40 $\mu\text{g/ml}$) ^a	-0,737*	-0,927**	-0,620 n.s.
P recuperado/P aplicado	-0,826*	-0,970**	-0,620 n.s.

^a - Quantidade de fósforo em solução após agitação do material de solo com 40 $\mu\text{g/de P/ml}$ por 24 horas.

^b - Coeficiente angular da equação de regressão ajustada entre fósforo disponível pelo extrator Mehlich 1 e fósforo aplicado.

n.s. não-significativo.

* excede o nível de probabilidade de 5%.

** excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 6 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre a capacidade tampão máxima, os parâmetros da isoterma de Langmuir e algumas características do solo

Característica	Capacidade tampão máxima	Adsorção máxima	Energia de adsorção
Adsorção máxima (x_m)	0,911**	-	-
Energia de adsorção (k)	0,866**	0,587 n.s.	-
Conteúdo de argila	0,900**	0,937**	0,687 n.s.
Teor de carbono	0,843**	0,771*	0,558 n.s.
Equivalente de umidade	0,884**	0,952**	0,624 n.s.
Água retida a -1/3 bar	0,896**	0,955**	0,632 n.s.
P em solução (40 µg/ml) ^a	-0,737*	-0,927**	-0,620 n.s.
P recuperado/P aplicado	-0,825*	-0,970**	-0,620 n.s.

^a - Quantidade de fósforo em solução após agitação do material de solo com 40 µg/de P/ml por 24 horas.

^b - Coeficiente angular da equação de regressão ajustada entre fósforo disponível pelo extrator Mehlich 1 e fósforo aplicado.

n.s. não-significativo.

* excede o nível de probabilidade de 5%.

** excede o nível de probabilidade de 1%.

Por outro lado, SCHWERTMAN (1966) verificou que compostos orgânicos têm efeito inibidor sobre o desenvolvimento de cristais de hidróxido férrico amorfo, através da adsorção de ácidos húmicos e fúlvicos à superfície positivamente carregada. Conseqüentemente, é de esperar maior superfície de adsorção nos cristais de menor tamanho. Tal mecanismo é também aceito por SANCHEZ e UEHARA (1960), segundo os quais maior quantidade de matéria orgânica pode levar a um aumento nos sesquióxidos finamente divididos. No entanto, não há informações suficientes para estabelecer o efeito inibidor da matéria orgânica na cristalização de compostos de alumínio. Desde que o mecanismo proposto esteja correto, a relação entre matéria orgânica e adsorção é de natureza indireta. Um mecanismo de natureza direta é responsável, contudo, pelas correlações obtidas entre capacidade tampão, argila, equivalente de unidade e água retida a $-1/3$ de bar. As características determinadas, ligadas à água no solo, retratam o fenômeno de adsorção de natureza eletrostática. Embora a adsorção de fosfato envolva o estabelecimento de ligações covalentes (HINGSTON *et alii*, 1967, 1974; PARFITT *et alii*, 1975; PARFITT, 1978), as correlações obtidas sugerem que os parâmetros de água empregados fornecem uma estimativa da superfície disponível para adsorção, independentemente do tipo da força de atração. O uso de medidas indiretas de capacidade tampão, como fósforo em solução e declividade do aumento de fósforo, pelo extrator Mehlich 1, são baseadas, pelos resultados obtidos, também na superfície disponível para adsorção. Dessa forma, nenhuma alteração na energia de adsorção será refletida pelas medidas indiretas da capacidade tampão.

Embora a fração argila apresente estreita correlação com a adsorção e com a capacidade tampão, é desejável a identificação do componente mineralógico responsável pelas variações observadas nos dois parâmetros de disponibilidade de fósforo. Dentre os componentes considerados na mineralogia dos materiais de solo estudados (Quadro 3), a goethita foi responsável por 97% e 86% das variações observadas na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima, respectivamente (Quadros 7 e 8). Resultado semelhante foi obtido por JONES (1981) em materiais de solo de Porto Rico. Esse autor ve-

QUADRO 7 - Análise de variância da equação de regressão ajustada entre capacidade tampão máxima e componentes mineralógicos do material de solo^{1/}

Fonte de variação	GL	QM	R ²	Equação de regressão ^{1/}
Devida a Go	1	1,23.10 ⁷ **	0,966	Y = 56,25 + 144,94 Go
Devida a Go e Gb	2	6,28.10 ⁶ **	0,983	
Devida a Gb, dado Go	1	2,20.10 ⁵ n.s.	0,017	
Devida a Go, Gb, Ka	3	4,22.10 ⁶ **	0,991	
Devida a Ka, dado Go e Gb	1	9,90.10 ⁴ n.s.	0,008	
Devida a Go, Gb, Ka e Hm	4	3,17.10 ⁶ **	0,991	
Devida a Hm dado Go, Gb e Ka	1	2,00.10 ³ n.s.	0,000	

+ - Go - goethita; Gb - gibbsita; Ka - caolinita; Hm - hematita.

n.s. - não-significativo.

** - excede o nível de probabilidade de 1%.

^{1/} - Y dado em ml/g e Go em % de goethita no material de solo.

QUADRO 8 - Análise de variância da equação de regressão ajustada entre capacidade máxima de adsorção e componentes mineralógicos do material de solo^{1/}

Fonte de variação	GL	QM	R ²	Equação de regressão ^{1/}
Devida a Go	1	1,85.10 ⁶ **	0,857	Y = 292,44 + 56,14 Gc
Devida a Go e Hm	2	1,01.10 ⁶ **	0,933	
Devida a Hm, dado Go	1	1,63.10 ⁵ n.s.	0,076	
Devida a Go, Hm e Gb	3	6,82.10 ⁵ **	0,946	
Devida a Gb, dado Go e Hm	1	2,90.10 ⁴ n.s.	0,013	
Devida a Go, Hm, Gb e Ka	4	5,13.10 ⁵ *	0,950	
Devida a Ka, dado Go, Hm e Gb	1	7,40.10 ³ n.s.	0,004	

+ - Go - goethita; Hm - hematita; Gb - gibbsita; Ka - caolinita.

n.s. - não-significativo.

* - excede o nível de probabilidade de 5%.

** - excede o nível de probabilidade de 1%.

^{1/} - Y dado em µg P/g e Go em % de goethita no material de solo.

rificou, no entanto, que, além da abundância do mineral, é importante, na adsorção de fosfato, o tamanho médio do cristalito.

Em outro trabalho, JONES et alii (1982) observaram que a adsorção de fósforo foi mais dependente de goethita e gibbsita que de outros componentes das amostras de solo. Praticamente, o efeito da sílica na adsorção pode ser atribuído à sua ação diluidora sobre a goethita e, em menor grau, sobre a gibbsita. Os mencionados autores não utilizaram, contudo, nenhuma técnica para separar o efeito dos dois componentes na adsorção. Utilizando a equação de regressão ajustada entre capacidade máxima de adsorção (em $\mu\text{g P/g solo}$) e porcentagem de goethita no material de solo (Quadro 8), foi obtido o valor de adsorção de $181 \mu\text{mol PO}_4^{3-}/\text{g}$ de goethita. Esse valor é razoável, quando comparado com o obtido por PARFITT et alii (1975), de $210 \mu\text{mol de PO}_4^{3-}/\text{g}$ a pH 3,5, em goethita pura. Deve-se considerar que inúmeros fatores, tais como morfologia e tamanho dos cristais (NALOVIC et alii, 1975; SCHWERTMANN e TAYLOR, 1977), e as condições de obtenção dos dados (McLAUGHLIN et alii, 1981) influenciam os valores obtidos.

Pode-se ainda especular que a substituição isomórfica parece não ter influenciado a adsorção de fosfato. Apesar das reservas na comparação de dados de sistemas puros e de material de solo, é previsível que a natureza bidentada da ligação existente entre a superfície da goethita e o ânion fosfato (ATKINSON et alii, 1974; PARFITT et alii, 1975) tenha acentuado os efeitos na reversibilidade do fósforo adsorvido. Nesse caso, espera-se, pelos dados de KINGSTON et alii (1974), que na goethita substituída essa reversibilidade seja maior.

4.1.3. Adsorção de Fósforo em relação à Calagem e à Adubação Fosfatada

Nas amostras em que foi efetuada a correção da acidez, para atingir pH de 6,5, verificou-se acentuada redução na energia de adsorção, em comparação com os valores obtidos nas amostras sem calagem (Quadros 5 e 9). Na maioria dos materiais ocorreu tendência de diminuição da capacidade máxima de adsorção, exceto em TM-5 e TM-6. Resultado semelhante, quanto à

QUADRO 9 - Índices de disponibilidade de fósforo nas amostras de material de solo com calagem

Classe de solo	Identificação	Energia de adsorção (k)	Capacidade máxima de adsorção (x _m)	Capacidade tampão máxima
		ml/ µg	µg/g	ml/g
AQd	TM-5	0,49	252	128
LEdn	TM-6	0,16	227	36
LEdn	TM-18	0,53	223	118
LEdr	TM-42	0,25	244	61
LEdr	TM-14	0,24	813	195
LVar	TM-56	1,00	1165	1165
LEdr	AP-C13	1,79	1262	2259
LVar	TM-67	0,72	1011	728

redução da energia de retenção, foi também verificado quando se efetuou a adubação fosfatada (Quadro 10). Não se verificou, no entanto, tendência definida na variação da adsorção máxima conforme a aplicação das diferentes doses de fósforo. Nos materiais mais argilosos, nos quais a goethita atinge maiores valores, a adsorção máxima praticamente não variou, caracterizando uma situação de equilíbrio, quanto à superfície de adsorção, mantida constante.

Uma das pressuposições para a aplicação do modelo de Langmuir é que a energia de adsorção não varie conforme a superfície já coberta pelo ânion (PARFITT, 1978). Entretanto, tem sido verificada experimentalmente a existência de regiões de adsorção (MULJADI *et alii*, 1966a; SYERS *et alii*, 1973; HOLFORD *et alii*, 1974; RAJAN e FOX, 1975; RYDEN *et alii*, 1977a; RYDEN e PRATT, 1980) em que variam tanto a energia quanto a adsorção máxima. Esses trabalhos, ao estabelecerem diversas regiões nas quais são admissíveis as variações de energia e adsorção máxima, procuram validar o uso da equação de Langmuir. A falha do modelo reside, no entanto, em não considerar que tanto o íon quanto a superfície dispõem de carga elétrica (BONDEN *et alii*, 1977).

O modelo de RYDEN *et alii* (1977a) propõe, além de três regiões, a existência de dois tipos de adsorção, de natureza química e física, estando associadas, de forma inversa, a energia e a capacidade máxima de adsorção. Conceitualmente, é difícil conciliar, para uma mesma superfície, pontos de diferentes afinidades, isolados, que sejam responsáveis pelas diversas regiões e que a adsorção ocorra em etapas. Quando se consideram os valores obtidos de energia e capacidade máxima de adsorção numa faixa limitada de fósforo adicionado (Quadro 11), verifica-se o mesmo comportamento obtido em toda a faixa de concentração empregada (Quadro 10). Os valores de adsorção máxima, variaram, sobretudo nos materiais com menor teor de argila (TM-5, TM-6, TM-10 e TM-42), ao passo que nos materiais mais argilosos esse parâmetro permaneceu praticamente constante. Embora tenha sido feita uma separação de regiões, a energia de adsorção decresceu sistematicamente com a aplicação de fósforo em todos os materiais estudados. A se

QUADRO 10 - Valores de energia e capacidade máxima de adsorção da equação de Langmuir para uma única superfície de adsorção, considerando a adubação fosfatada

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Energia de adsorção k	Capacidade máxima de adsorção x_m	Coefficiente de determinação R^2
		kg/ha	ml/g	mg/g	
AQd	TM-5	60	0,31	103	0,925**
		120	0,37	103	0,951**
		240	0,15	191	0,923**
		360	0,12	180	0,958**
LEdm	TM-6	50	0,16	158	0,954**
		100	0,15	134	0,954**
		200	0,09	127	0,984**
		300	0,07	92	0,943**
LEdm	TM-18	70	0,29	211	0,974**
		140	0,23	197	0,974**
		280	0,09	225	0,997**
		420	0,04	277	0,989**
LEdr	TM-12	60	0,16	283	0,951**
		120	0,16	244	0,986**
		240	0,10	254	0,957**
		360	0,04	354	0,994**
LEdr	TM-14	120	0,42	691	0,952**
		240	0,28	695	0,956**
		360	0,30	644	0,948**
		480	0,21	648	0,971**
LVar	TM-56	170	1,43	1144	0,966**
		340	1,18	1078	0,960**
		510	0,91	1112	0,967**
		680	0,79	1076	0,972**
LEdr	AP-C13	52	1,48	1255	0,974**
		203	1,56	1196	0,970**
		390	1,13	1257	0,980**
		520	0,81	1232	0,977**
LVar	TM-67	160	0,66	1086	0,950**
		320	0,55	1002	0,957**
		480	0,59	1008	0,960**
		640	0,44	983	0,963**

** Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 11 - Valores da energia e capacidade máxima de adsorção da equação de Langmuir para uma única superfície de adsorção, considerando a adubação fosfatada^{1/}

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Energia de adsorção k	Capacidade máxima de adsorção x_m	Coefficiente de determinação R^2
		kg/ha	ml/g.g	mg/g	
AqM	TM-5	60	3,10	85	0,930**
		120	1,11	101	0,977**
		240	0,62	97	0,957**
		360	0,21	134	0,975**
LEdm	TM-6	50	0,80	72	0,985**
		100	0,25	96	0,942**
		200	0,16	89	0,953**
		300	n.d.	n.d.	n.d.
LEdp	TM-18	70	0,91	117	0,985**
		140	0,45	140	0,991**
		280	0,12	176	0,982**
		420	0,09	123	0,902**
LEdr	TM-42	60	0,99	111	0,991**
		120	0,50	128	0,989**
		240	0,22	153	0,942**
		360	0,11	147	0,937**
LEdr	TM-14	120	1,55	428	0,990**
		240	1,08	470	0,972**
		360	1,10	399	0,993**
		480	0,65	486	0,978**
LVar	TM-56	170	11,97	565	0,994**
		340	9,13	500	0,968**
		510	5,94	520	0,985**
		680	3,88	552	0,995**
LEdr	AP-C13	52	8,06	683	0,972**
		208	7,51	601	0,974**
		390	5,65	591	0,992**
		520	4,59	560	0,995**
LVar	TM-67	160	4,83	480	0,990**
		320	3,46	495	0,994**
		480	2,75	544	0,990**
		640	2,17	514	0,937**

1/ Calculado para valores de fósforo adicionado até 10 mg/g para os materiais TM-5 a TM-42 e de 40 mg/g para os materiais TM-14 a TM-67.

n.d. não determinado.

** excede o nível de probabilidade de 1%.

paração efetuada mostrou ainda a relação, evidenciada em outros trabalhos (SYERS *et alii*, 1973; HOLFORD *et alii*, 1974; RYDEN *et alii*, 1977a), entre energia e adsorção máxima. Comparando os dados dos Quadros 10 e 11, a região separada apresentou-se com maior nível de energia e menor capacidade de adsorção que os da isoterma obtida em toda a faixa de concentração de fósforo.

Teoricamente, espera-se que, desde que não haja mudança na constituição da superfície adsorvente, os valores de capacidade máxima de adsorção permaneçam constantes. A variação da energia de adsorção conforme as mudanças de pH e nível de saturação de fósforo na superfície adsorvente sugere o envolvimento de algum fenômeno de mudança de carga. Essa mudança poderia ser processada através de íons, que, quando adsorvidos, alterariam o potencial eletrostático da superfície adsorvente. Esse princípio constitui o fundamento do modelo de BOWDEN *et alii* (1977, 1980), expresso pela equação (BARROW *et alii*, 1980; BOWDEN *et alii*, 1980)

$$S = \frac{N_t K_p C \exp(-z F \psi_a / RT)}{1 + K_p C \exp(-z F \psi_a / RT)}$$

na qual

S é o fosfato adsorvido,

N_t é a adsorção máxima,

K_p é a constante de ligação para $H_2PO_4^-$,

z é a sua valência,

C é a concentração de íons $H_2PO_4^-$ em solução,

ψ_a é o potencial eletrostático no plano de adsorção e

F, R e T têm o significado físico-químico normal.

A diferença entre esse modelo e o de Langmuir é a consideração das cargas tanto do íon quanto da superfície (BARROW *et alii*, 1980). Embora os dados obtidos tenham sido ajustados à equação de Langmuir, o modelo de BOWDEN *et alii* (1977, 1980) é válido para explicar a variação observada

nos valores de energia de adsorção. Por esse modelo, à medida que o pH é elevado, o potencial eletrostático no plano de adsorção decresce, ou seja, a superfície torna-se mais negativa. Por outro lado, a adsorção de ânions, para pH constante, torna a superfície também mais negativa, reduzindo o potencial no plano de adsorção e tornando a adsorção mais difícil (BOWDEN *et alii*, 1980). Esse mecanismo explica o decréscimo de energia observado tanto quando foi efetuada a calagem quanto a adubação fosfatada (Quadros 9, 10, 11). Por não dispor de termos que expressem a variação de carga na superfície adsorvente, a equação de Langmuir apresenta, assim, alteração das suas constantes. Embora os valores obtidos de adsorção máxima mostrem variação aleatória conforme a adubação fosfatada nos materiais TM-5, TM-6, TM-18 e TM-42, deve-se notar que nos demais materiais essa variação praticamente desapareceu. Provavelmente, esse comportamento está relacionado com a presença, em quantidade apreciável, de goethita e gibbsita nesses materiais (Quadros 3 e 4) e com o fato de que o desbalanceamento de carga na superfície foi menor. O decréscimo do potencial eletrostático no plano de adsorção tem efeito, tanto na maior reversibilidade do fosfato adsorvido quanto na possibilidade de repulsão de ânions em solos com predomínio de cargas negativas sobre positivas, em situações de alta saturação aniônica.

4.1.4. Fatores Intensidade, Quantidade e Capacidade Tampão

Nas amostras incubadas com diferentes níveis de fósforo e sem cultivo foram determinados os índices de disponibilidade, representados pela **concentração** de fósforo em solução de CaCl_2 0,01M (intensidade) e pelo teor de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 (Quadro 12). Calcularam-se, ainda, os valores de fósforo adsorvido (quantidade), com o emprego das concentrações de fósforo em solução nas isothermas de adsorção (Quadro 9). Os teores de fósforo em solução nos materiais de solo TM-56, AP-Cl3 e TM-67, apesar de apresentarem alteração com a adubação fosfatada, foram extremamente baixos. O método analítico empregado somente é sensível

QUADRO 12 - Fatores intensidade, quantidade de fósforo e teores de fósforo disponível nas amostras de material de solo, considerando a adubação fosfatada

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Intensidade CaCl_2 0,01M	Quantidade (P adsorvido)	Fósforo disponível	
					Mehlich 1	Bray 1
		kg/ha	($\mu\text{g/ml}$) $\cdot 10^3$		$\mu\text{g/g}$	
AQd	TM-5	00	2,2	2,8	15,0	23,0
		120	4,3	5,4	31,4	43,7
		240	15,5	18,5	80,5	90,3
		360	26,7	30,3	122,9	131,9
LEdm	TM-6	50	10,3	3,7	20,7	25,7
		100	21,0	7,4	35,0	38,9
		200	60,2	19,9	78,6	80,2
		300	116,8	35,7	117,6	113,7
LEdm	TM-18	70	4,1	4,7	19,5	27,4
		140	9,3	10,5	41,1	50,8
		280	35,2	35,1	95,6	103,6
		420	47,0	44,5	114,4	158,9
LEdr	TM-12	60	4,2	2,5	14,9	16,1
		120	9,8	5,8	27,1	26,1
		240	34,0	19,1	64,4	53,6
		360	75,8	38,9	99,4	88,7
LEdr	TM-14	120	1,2	2,3	5,6	12,9
		240	1,7	3,3	14,0	26,9
		360	2,5	4,3	22,2	39,8
		480	3,8	7,3	37,5	62,2
LVar	TM-56	170	0,9	10,4	2,6	8,0
		340	0,9	10,4	5,2	14,3
		510	1,3	14,9	9,3	23,3
		680	2,1	24,0	13,7	32,6
LEdr	AP-C13	52	1,2	26,5	5,4	10,3
		208	1,4	30,9	9,9	15,4
		390	1,6	35,1	14,0	22,7
		520	1,9	41,5	22,1	32,8
LVar	TM-67	100	0,7	5,1	2,6	8,0
		320	1,0	7,2	5,2	14,3
		480	1,6	11,5	9,3	23,3
		640	2,6	18,6	13,7	32,6

a variações da ordem de 0,01 $\mu\text{g P/ml}$ na solução de leitura. Dessa forma, diferenças inferiores a esse valor têm pouca precisão.

Para efeito de comparação dos materiais de solo, ajustaram-se equações de regressão entre a concentração de fósforo em solução e as doses aplicadas de fertilizante fosfatado (Quadro 13). O coeficiente linear dessas regressões indica a alteração causada no teor de fósforo em solução pela adição de 1 kg de P/ha. O quociente desses valores, considerando materiais de solo arenosos e argilosos, foi de quase trezentas vezes. A magnitude dessa razão está associada, parcialmente, no entanto, ao fato, já mencionado, de falta de sensibilidade do método de determinação empregado, o que reduziu os valores do coeficiente da regressão nos materiais TM-56, AP-CL3 e TM-67. Por outro lado, em solos de elevada capacidade tampão, esperam-se menores teores de fósforo em solução. Esse comportamento já foi verificado por OLSEN e WATANABE (1970), quando estudaram o suprimento de fósforo por difusão em solos com diferentes texturas, e por HOLFORD e MATTINGLY (1976b), ao relacionarem a capacidade tampão com a absorção de fósforo pelo vegetal. A maior concentração de fósforo em solução em solos arenosos está normalmente associada a baixos valores de capacidade tampão (KAMPRATH e WATSON, 1980). Para a mesma quantidade de fósforo absorvida pelo vegetal, haveria, proporcionalmente, maior redução da concentração de fósforo em solução no solo arenoso que no argiloso.

De acordo com a análise de correlação entre o coeficiente angular das regressões ajustadas (Quadro 13) e a capacidade tampão máxima (Quadro 9), verificou-se que o coeficiente de correlação somente foi significativo quando se consideraram apenas os dados de materiais de solo caoliníticos com baixo teor de goethita ($r = 0,938^*$). Os baixos valores dos coeficientes das regressões dos materiais de solo goethíticos ou com predominância de gibbsita (TM-56, AP-CL3 e TM-67) sugerem a tendência de permanecer o fósforo adicionado associado à fase sólida. A reposição na fase líquida dependerá, contudo, da natureza da ligação estabelecida entre a superfície adsorvente e o fosfato adsorvido.

O fósforo adsorvido, em equilíbrio com o que permanece em solu-

QUADRO 13 - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo em solução (Y), em $\mu\text{g/ml}$, e fósforo aplicado (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo com calagem

Classe de solo	Identificação	Coeficientes de regressão		Coeficiente de determinação (R^2)
		Intersecção	Linear	
AQd	TM-5	-0,043	$8,44 \cdot 10^{-4}$	0,987**
LEd	TM-6	-0,178	$4,30 \cdot 10^{-3}$	0,978*
LEdm	TM-18	-0,058	$1,31 \cdot 10^{-3}$	0,973*
LEdr	TM-42	-0,158	$2,40 \cdot 10^{-3}$	0,959*
LEdr	TM-14	0,002	$7,17 \cdot 10^{-5}$	0,958*
LVar	TM-56	0,003	$2,35 \cdot 10^{-5}$	0,833 n.s.
LEdr	AP-C13	0,011	$1,44 \cdot 10^{-5}$	0,974*
LVar	TM-67	-0,001	$3,94 \cdot 10^{-5}$	0,942*

n.s. - não-significativo.

* - excede o nível de probabilidade de 5%.

** - excede o nível de probabilidade de 1%.

ção (Quadro 12), é semelhante, na sua concepção, ao conceito, de BECKETT e WHITE (1964), de fósforo nas posições de troca livre ("net exchange sites"). O fósforo, nesses locais, segundo os autores citados, faria parte do fósforo lábil, juntamente com o retido na superfície e passível de troca isotópica. Na posição de troca livre, o fosfato pode ser trocado por OH^- ou por outros íons H_2PO_4^- , e a intensidade de cobertura nesses sítios é proporcional à atividade de H_2PO_4^- em solução. Nos locais de troca isotópica somente pode ocorrer a permuta de um íon fosfato por outro. A primeira categoria de íons fosfato é alterada por variações de fósforo em solução, ao passo que a segunda não responde a essas mudanças. Conseqüentemente, pelo conceito de BECKETT e WHITE (1964), o fosfato, nas posições de troca livre, estaria diretamente envolvido na reposição de fósforo em solução e constituiria o instrumento de ação da capacidade tampão desse elemento. A quantidade de fósforo adsorvida representa, assim, uma estimativa do fator quantidade que pode repor o fósforo em solução, quando há retirada desse nutriente, conforme estabeleceram HOLFORD e MATTINGLY (1976a).

Há, no entanto, duas pressuposições envolvidas na avaliação do fator quantidade pelo uso de isotermas de adsorção. A primeira refere-se à reversibilidade completa, prevista pela isoterma e que normalmente não se verifica. A troca por OH^- , dependendo da superfície, pode levar à formação de ligações covalentes de natureza mono ou bidentada. O tipo de ligação praticamente define a reversibilidade do fósforo adsorvido. Num superfície como a da goethita a adsorção é irreversível (HINGSTON *et alii*, 1974), ou reversível somente na condição de elevada saturação de fósforo (PARFITT, 1979a). Assim, os valores do fator quantidade nos materiais de solo goethíticos (principalmente AP-C13) devem ser considerados com reserva (Quadro 12). No caso da amostra AP-C13, o solo, provavelmente, sofreu influência de material proveniente da decomposição de tufitos (EMBRAPA, 1980), expresso, em parte, pelo elevado teor de P_2O_5 (0,33%) obtido pelo ataque sulfúrico. Dada a natureza da fração argila desse material de solo, constituída em grande parte por goethita, é provável que o fósforo indicado pelo fator quantidade (adsorvido o disponível) superestime a reserva desse nutriente

para o vegetal. O valor da energia de adsorção (Quadros 9 e 10) constitui, por outro lado, um indicativo de que o fosfato adsorvido pode ser convertido, conforme sugerem HOLFORD e WATTINGLY (1976a), em forma não-lábil, seja pela formação de fosfatos cristalinos estáveis, seja pela penetração na sua superfície dos íons de fósforo. A ligação bidentada proposta por PARETTI *et alii* (1975) resulta na redução da disponibilidade do fósforo adicionado, principalmente em condições de baixa saturação de fosfato na superfície adsorvente (PARETTI, 1979a).

A segunda pressuposição é que a capacidade tampão seja um termo constante. As equações do Quadro 14 expressam essa situação, e os valores do coeficiente linear representam a capacidade tampão. Os valores obtidos assemelham-se aos do Quadro 9, de onde foram derivados os índices de disponibilidade (quantidade e capacidade tampão). A interseção das retas é o valor Q_0 , definido por BECKETT e WHITE (1964) como a quantidade de fósforo retida nos locais de troca livre, que deve ser removida para que o fator intensidade seja reduzido a zero. Esses valores, pela sua magnitude, expressam a baixa disponibilidade de fósforo, já mencionada anteriormente, nas amostras sem adubação fosfatada. A semelhança dos dados de fósforo em solução de CaCl_2 0,01M, ajustaram-se equações de regressão entre o teor de fósforo disponível, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 e as doses de fósforo aplicadas (Quadro 15). Os coeficientes da componente linear mostraram variações entre materiais de solo, relacionadas com a superfície adsorvente (Quadro 16). Assim, esse índice está associado à capacidade tampão máxima, principalmente pela componente adsorção máxima, e não é sensível a variações de energia de retenção.

A adição de fósforo, por outro lado, provocou modificações nos teores de fósforo disponível, pelos extratores empregados, na razão inversa do conteúdo de argila. Esse efeito é atribuído, por alguns autores, à exaustão do extrator pela argila (PRATT e GARBER, 1964; BALDOVINOS e THOMAS, 1967; THOMAS e PEASLEE, 1973; KAMPATH e WATSON, 1980) e constitui a razão principal da separação de níveis críticos de fósforo por classe textural.

Comparando os coeficientes das regressões, para os dois extrato-

QUADRO 14 - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre quantidade de fósforo adsorvido (Y), em $\mu\text{g}/\text{g}$, e fósforo em solução (X), em $\mu\text{g}/\text{ml}$, nas amostras de material de solo com calagem

Classe de solo	Identificação	Coeficientes de regressão		Coeficiente de determinação (R^2)
		Interseção	Linear	
AQd	TM-5	0,56	112,42	0,999**
LEdm	TM-6	1,06	29,95	0,999**
LEdm	TM-18	1,47	93,03	0,998**
LEdr	TM-42	0,89	50,68	0,998**
LEdr	TM-14	0,02	191,71	1,000**
LVar	TM-56	0,19	1133,33	1,000**
LEdr	AP-C13	0,89	2138,38	1,000**
LVar	TM-67	0,11	711,27	1,000**

** Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 15 - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo aplicado (X), em kg/ha, nas amostras de material de solo com calagem

Classe de solo	Identificação	Coeficientes da regressão (Mehlich 1)		Coeficiente de determinação R^2	Coeficientes da regressão (Bray 1)		Coeficiente de determinação R^2
		Interseção	Linear		Interseção	Linear	
AQc	TM-5	-9,24	0,3676	0,997**	0,82	0,3662	0,999**
LEdm	TM-6	-1,37	0,3960	0,997**	5,93	0,3612	0,996**
LEdm	TM-18	3,52	0,2819	0,959*	-0,65	0,3773	0,999**
LEdr	TM-42	-4,57	0,2873	0,997**	-1,31	0,2432	0,991**
LEdr	TM-14	-6,15	0,0866	0,974*	-4,75	0,1340	0,982**
LVar	TM-56	-1,65	0,0220	0,988**	-1,15	0,0487	0,993**
LEdr	AP-C13	2,99	0,0337	0,950*	6,64	0,0467	0,963*
LVar	TM-67	-1,65	0,0234	0,988**	-1,15	0,0510	0,993**

* Excede o nível de probabilidade de 5%.

** Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 16 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre o coeficiente P recuperado/P aplicado e diferentes parâmetros do solo

Parâmetros	P recuperado/P aplicado	
	Mehlich 1	Bray 1
P recuperado/P aplicado (Bray 1)	0,961**	-
Capacidade tampão máxima	-0,710*	-0,735*
Adsorção máxima (x_m)	-0,951**	-0,953**
Energia de adsorção (k)	-0,632 n.s.	-0,632 n.s.
Conteúdo de argila	-0,946**	-0,972**
Equivalente de unidade	-0,946**	-0,982**
Água retida a -1/3 bar	-0,941**	-0,977**
P em solução (40 $\mu\text{g/ml}$) ^a	0,857**	0,928**

^a - Quantidade de fósforo em solução após agitação do material de solo com 40 μg de P/ml durante 24 horas.

n.s. - Não-significativo.

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

res (Quadro 15), verifica-se, no entanto, que houve tendência de maior extração por unidade de fósforo aplicada para o Bray 1, principalmente nos materiais de solo com maior teor de argila. Essa tendência, possivelmente, está associada ao efeito complexante do flúor contido nesse extrator sobre ferro e alumínio, em meio ácido (THOMAS e PEMBLEE, 1973), manifestado, com maior expressão, nos materiais de solo que contêm gibbsita e/ou goethita em quantidades apreciáveis (Quadro 3). A relação entre os teores obtidos pelos extratores Mehlich 1 (Y) e Bray 1 (Z) pode ser expressa pela equação $Y = -6,22 + 0,94Z$, com $R^2 = 0,933^{**}$.

As correlações entre os parâmetros de água no solo, além do significado relativo à adsorção, indicam a possibilidade do uso dessas medidas para estimar o aumento do fósforo disponível conforme a adubação. Trabalhos de FREIRE *et alii* (1979) e NOVAIS e KAMPATHI (1979b) também confirmam essa possibilidade.

Com os dados obtidos (Quadros 9 e 12) procurou-se estabelecer as relações entre fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e os fatores quantidade (fósforo adsorvido) e capacidade tampão. Não foram utilizados os valores de intensidade (fósforo em CaCl_2 0,01M), uma vez que há relação entre esse fator e o parâmetro quantidade. Essa relação, embora de natureza não-linear, decorre do fato de que o fator quantidade foi calculado a partir dos dados de fósforo em solução de CaCl_2 0,01M, aplicados às isotermas de adsorção.

Os teores obtidos pelos dois extratores químicos estão relacionados com o fator quantidade empregado, que explicou cerca de 36% da variação observada nesses teores (Quadro 17). A inclusão do fator capacidade ocasionou, nos dois casos, aumentos substanciais no poder preditivo do modelo empregado. Para os dois extratores, os coeficientes do fator quantidade indicaram que houve maior remoção de fósforo que o representado pelo fósforo adsorvido. Esse efeito foi evidenciado principalmente nos materiais de solo de menor capacidade tampão (Quadro 12). Há pelo menos duas hipóteses para explicar a ocorrência desse fato: reposição do fósforo lábil extraído, ou remoção, além do fósforo lábil, de parte do fósforo não-lábil. A

QUADRO 17 - Equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, fósforo adsorvido (Q) e capacidade tampão máxima (C)

Variável dependente ⁺		Coeficiente de determinação (R ²) devido a:	
		Modelo completo	Variável introduzida
Mehlich 1	$Y = 8,03 + 1,70 Q$	0,356**	
	$Y = 17,55 + 2,56 Q - 0,0410 C$	0,915**	0,559**
Bray 1	$Y = 15,88 + 1,75 Q$	0,353**	
	$Y = 25,25 + 2,50 Q - 0,0403 C$	0,878**	0,515**

+ - Teor de fósforo obtido pelo extrator químico.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

primeira hipótese seria mais adequada quando aplicada ao relacionamento entre o fator quantidade e a absorção de fósforo pelo vegetal. A hipótese alternativa parece ser mais correta no caso presente, tendo em vista o modo de ação dos extratores químicos, que inclui, além do deslocamento do fósforo adsorvido, a dissolução de fosfatos pelo ácido presente. O efeito redutor da capacidade tampão sobre os teores de fósforo disponível mostra que os extratores químicos utilizados são sensíveis a esse fator, segundo o modelo de HOLFORD e MATTINGLY (1979) e HOLFORD (1980a, b). Para HOLFORD e MATTINGLY (1979), um extrator químico deve simular o sistema radicular da planta, extraíndo uma quantidade de fosfato que se relaciona diretamente com o fósforo lábil e inversamente com a capacidade tampão. Os extratores utilizados preenchem essa condição, e HOLFORD (1980a, b) já havia estabelecido a sensibilidade do extrator Bray 1 à capacidade tampão. O extrator Mehlich, foi, no entanto, considerado por HOLFORD (1980a) insensível a essa característica. A sensibilidade verificada pode estar relacionada com a exaustão dos extratores químicos pela goethita, principal responsável pelas variações observadas na capacidade tampão (Quadro 7). Nesse caso, é possível tenha ocorrido o envolvimento dos seguintes mecanismos, que reduziram o poder de remoção dos extratores: protonação do grupamento FeOH , resultando em FeOH_2^+ , que pode adsorver ânions SO_4^{2-} , F^- ou mesmo readsorver o fósforo extraído; ocorrência dessa mesma adsorção aniônica na superfície de grupamentos FeOH e FeOH_2^+ , naturalmente existentes no solo; consumo dos íons F^- pela complexação do ferro em superfícies em que não há fósforo adsorvido. Os mecanismos mencionados também devem ser eficientes quando se consideram grupamentos AlOH ou AlOH_2^+ .

Independentemente da natureza da fração argila, mas importante na exaustão deve ser o pH da amostra de solo analisada. Nesse caso, há principalmente consumo de íons H^+ , que reduzem a ação de dissolução de compostos de fósforo pelo extrator. Teoricamente, entre os dois extratores testados, o Mehlich 1, por ser constituído de mistura de dois ácidos com pH de 1,2 (THOMAS e PEASLEE, 1973), deveria ser o mais atingido. Seu menor poder de extração, em relação ao Bray 1, pode estar parcialmente associado a esse

fator, considerando que os materiais de solo tiveram seu pH corrigido para 6,5.

A sensibilidade do extrator pode também ser alterada pela variação da relação solo:extrator e tempo de agitação (HOLFORD, 1980b). O comportamento esperado é que a sensibilidade varie inversamente aos aumentos na relação mencionada e no tempo de agitação.

As correlações entre os teores de fósforo disponível obtidas por diferentes extratores têm sido atribuídas à extração preferencial de determinada forma de fósforo, associada à maior atividade da forma preferencialmente extraída (BAHIA FILHO e BRAGA, 1975b; KAMPRATH e WATSON, 1980). Entretanto, HOLFORD (1980b) considera que, quanto mais similares forem dois extratores na sua sensibilidade ao tamponamento, maior será a correlação entre eles. De acordo com esse enfoque, os extratores Mehlich 1 e Bray 1, pelos resultados obtidos, teriam sensibilidade semelhante, justificando a estreita correlação existente entre eles ($r = 0,966^{**}$). A extração preferencial e a atividade da forma estariam, contudo, associadas à extração do fósforo lábil, que seria influenciada negativamente pela capacidade tampão.

4.1.5. Índices de Capacidade Tampão

A partir das isotermas de adsorção determinadas nas amostras adubadas e das concentrações de fósforo em solução (Quadros 10, 11 e 12), calcularam-se os índices de capacidade tampão (Quadro 13).

Diante, principalmente, da redução sistemática da energia de adsorção, verificada com a aplicação de fósforo (Quadros 10 e 11), os índices de capacidade calculados não foram constantes. A capacidade tampão máxima proposta por HOLFORD e MATTINGLY (1976a) apresenta, segundo seus idealizadores, a vantagem de não variar conforme a concentração de fósforo em solução. Dessa forma, integra os componentes da adsorção de natureza intensiva (energia de adsorção) e extensiva (adsorção máxima) e é independente da saturação de fósforo (HOLFORD e MATTINGLY, 1976a). A condição de inde-

QUADRO 18 - Índices de capacidade tampão de fósforo nas amostras de material de solo, considerando a adubação fosfatada

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Capacidade tampão		Índice tampão	Índice de adsorção
			Máxima	Equilíbrio		
		kg/ha		ml/g		µg/g
AQd	TM-5	60	61	61	264	16,8
		120	61	60	112	16,6
		240	29	27	60	8,2
		360	22	20	28	6,3
LEdm	TM-6	50	25	24	58	7,2
		100	20	19	34	5,8
		200	11	10	14	3,3
		300	6	6	n.d.	1,9
LEdm	TM-18	70	61	61	106	16,9
		140	45	43	53	12,7
		280	20	19	21	5,9
		420	11	10	11	3,3
LEdr	TM-42	60	45	45	111	13,0
		120	39	38	64	11,2
		240	25	24	34	7,4
		360	14	13	16	4,2
LEdr	TM-14	120	290	288	663	77,3
		240	195	193	545	53,9
		360	193	191	439	53,2
		480	136	134	264	38,4
LVar	TM-56	170	1011	1590	6045	342,5
		340	1272	1248	4505	281,8
		510	1011	937	3009	238,5
		680	850	829	2142	206,2
LEdr	AP-C13	52	1857	1782	4099	385,9
		208	1866	1776	4514	381,3
		390	1420	1370	3180	318,2
		520	998	967	2570	240,8
LVar	TM-67	160	664	658	2118	166,3
		320	551	545	1713	141,9
		480	594	584	1496	151,6
		640	433	423	1115	114,6

n.d. - Não determinado.

pendência somente é verificada, entretanto, se não houver alteração na inclinação da isoterma de adsorção do solo adubado, em comparação com o não-adubado. Quando ocorre mudança na inclinação e, conseqüentemente, na energia de adsorção, a capacidade tampão máxima passa a ser dependente da saturação de fósforo. Essa situação, anteriormente verificada por HOLFORD e MATTINGLY (1976b), limita, segundo esses autores, a utilização desse índice do fator capacidade.

A capacidade tampão de equilíbrio depende da concentração de fósforo em solução para a qual é calculada, sendo, portanto, variável. Esse parâmetro foi utilizado por BAHIA FILHO e BRAGA (1975a) na descrição da disponibilidade de fósforo em Latossolos. Nesse trabalho foi verificado que a maioria das relações observadas entre os fatores quantidade (fósforo adsorvido) e intensidade (potencial de fosfato monocálcico) era curvilínea. Eventualmente, podem ser considerados segmentos da curva obtida em faixa de concentração mais baixa para calcular a capacidade tampão como termo constante. No entanto, esse procedimento não parece ser eficiente quando se verifica que mesmo quando a concentração de equilíbrio tende para zero há variação na capacidade tampão (Quadro 18).

Na obtenção de dados para a isoterma de adsorção é possível ocorrer, ao lado da adsorção, precipitação de fosfatos. O índice tampão é empregado justamente para cobrir a região de baixa concentração na isoterma, que não é atingida pela precipitação (HOLFORD, 1979). As diferenças entre materiais de solo, com relação a esse índice, são ainda mais acentuadas, diante, principalmente, dos valores de energia de adsorção dessa região (Quadro 11). Mesmo com a restrição de baixa concentração de fósforo em equilíbrio ($6 \mu\text{g P/ml}$), o índice tampão mostrou-se sensível à adubação fosfatada. Para o material de solo TL-6, com a dose de 300 kg de P/ha , não foi possível determinar esse índice, uma vez que os dados utilizados não se ajustaram à equação de Langmuir. O decréscimo observado no índice de adsorção, conforme os níveis de fósforo empregados, expressa a menor quantidade de fósforo adsorvido necessária para manutenção do nível desse nutriente em solução em $0,3 \mu\text{g P/ml}$. A tendência de decréscimo não indica, todavia,

que há redução na capacidade máxima de adsorção, como afirmam SANCHEZ e UEHARA (1980), mas que há maior reversibilidade do fósforo adsorvido.

Os valores dos índices de capacidade tampão empregados foram submetidos à análise de correlação. Os coeficientes de correlação obtidos (Quadro 19) mostrararam estreita ligação entre os índices utilizados, constituindo um indicativo da mesma tendência de variação de valores, não significando, no entanto, sua equivalência, que somente pode ser verificada se os índices forem igualmente eficientes para, por exemplo, aumentar o poder preditivo de um modelo que considere a absorção de fósforo dependente dos fatores quantidade e capacidade.

QUADRO 19 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre capacidade tampão máxima (C_{tm}), capacidade de equilíbrio (C_{te}), índice tampão (I_t) e índice de adsorção (I_a)

	C _{te}	I _t	I _a
C _{tm}	1,000**	0,974**	0,966**
C _{te}	-	0,976**	0,997**
I _t	-	-	0,971**

** Excede o nível de probabilidade de 1%.

A capacidade tampão, embora represente a resistência à mudança do fator intensidade (KHASAWNEH, 1971; HOLFORD, 1979), está inversamente relacionada com a facilidade com que o fósforo lábil move-se da fase sólida para a líquida (HOLFORD e MATTINGLY, 1976a, b). Assim, para qualquer dos índices empregados, a tendência observada é de maior facilidade de reposição do fósforo em solução com a adubação fosfatada.

4.2. Fatores Quantidade, Capacidade Tampão e Crescimento Vegetal

4.2.1. Ensaio em Casa de Vegetação

Os dados de produção de matéria seca, obtidos após cada cultivo (Quadro 20), mostraram variações, relacionadas com os tratamentos aplicados e com os cultivos efetuados. A produção de matéria seca decresceu com maior intensidade de primeiro para os demais cultivos nos tratamentos que receberam as menores doses de fósforo, associados, principalmente, com os materiais de solo com maior teor de goethita e/ou gibbsita (TM-14, TM-56, AP-C13 e TM-67).

No primeiro cultivo, os tratamentos que incluíam os materiais de solos arenosos (TM-5, TM-6 e TM-18) apresentaram pequena resposta à aplicação de fósforo, quando comparados com os demais. A quantidade de matéria seca obtida foi muito inferior à dos demais tratamentos. Esse comportamento, em parte, pode ser atribuído ao sódio contido na fonte de fósforo empregada ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Removido o sódio pela lavagem dos materiais de solo, entre o segundo e o terceiro cultivos, o crescimento obtido foi normal, de acordo com as doses de fósforo aplicadas. No material de solo AP-C13, a partir do segundo cultivo foi verificado amarelecimento generalizado na parte aérea do milho. Esse problema agravou-se no terceiro cultivo depois de efetuada a lavagem. A aplicação de molibdênio eliminou o amarelecimento verificado e, no quinto cultivo, propiciou crescimento normal das plantas de milho, em comparação com os demais tratamentos. Os dados obtidos sugerem que o vegetal removeu a maior parte do molibdênio disponível já no primeiro cultivo, remoção complementada pela lavagem de material do solo. É possível, diante da resposta à aplicação de molibdênio, que o amarelecimento observado estivesse refletindo a ineficiência no aproveitamento do nitrogênio aplicado. Esse fato pode estar associado à redução da atividade da enzima nitrato redutase (MENGEL e KIRKBY, 1979).

Considerando o nível crítico de 0,09% de fósforo na parte aérea de

QUADRO 20 - Produção de matéria seca de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Produção de matéria seca nos cultivos				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
		kg/ha			g/vaso		
ACM	TM-5	60	4,64	1,94	2,83	1,03	1,48
		120	5,04	3,23	6,07	3,38	2,68
		240	6,07	3,89	6,62	6,78	5,23
		300	6,55	5,20	8,44	8,86	5,88
LEdm	TM-6	50	5,77	3,95	4,20	2,21	2,86
		100	7,09	5,39	5,63	4,92	3,77
		200	6,91	6,45	7,00	7,70	6,16
		300	7,25	6,59	8,13	9,66	7,21
LEdm	TM-18	70	7,14	5,00	3,15	2,21	2,18
		140	7,49	6,39	5,87	4,80	3,73
		280	7,48	6,69	8,14	7,96	6,16
		420	8,18	7,22	9,89	9,26	7,51
LEdr	TM-42	60	9,87	6,34	2,62	3,29	3,48
		120	12,20	9,15	5,35	4,12	4,94
		240	13,17	11,20	10,35	5,16	6,27
		360	12,95	11,98	13,68	8,85	6,93
LEdr	TM-14	120	10,18	3,18	1,22	1,22	1,40
		240	11,60	6,09	4,62	2,24	2,93
		360	12,91	7,96	9,55	4,32	4,17
		480	12,67	8,45	12,04	6,59	5,59
LVar	TM-56	170	12,08	2,27	0,80	0,87	0,86
		340	15,92	3,39	1,33	1,51	1,50
		510	17,71	7,97	2,68	2,68	3,90
		680	18,18	10,82	7,96	5,49	4,62
LEdr	AP-C13	52	4,91	1,51	1,34	1,52	1,09
		208	13,72	2,07	2,52	1,23	1,80
		390	19,11	3,83	2,18	2,40	3,96
		520	19,91	6,12	2,81	3,52	6,28
LVar	TM-67	160	10,91	1,70	0,87	0,86	0,96
		320	15,94	5,46	1,61	1,94	2,19
		480	18,22	7,76	4,40	4,29	4,80
		640	17,48	10,70	9,07	6,41	5,43
Média			11,24	5,93	5,42	4,30	3,98
		DMS _{0,05} = cultivos				0,07	
		DMS _{0,05} = interação tratamentos x cultivos				0,41	

milheto (NOVAIS, 1977), observou que, na maioria dos tratamentos e dos cultivos, foram obtidos teores superiores a esse valor (Quadro 21). Nos tratamentos constituídos por materiais de solo goethíticos e menores doses de fósforo, bem como nos últimos cultivos, os teores obtidos situaram-se abaixo do nível crítico.

Com os dados obtidos de produção de matéria seca e teores de fósforo calcularam-se as quantidades de fósforo removidas em cada cultivo (Quadro 22). Nesse cálculo foram utilizados os dados das três repetições, considerando ainda a variação na quantidade de material de solo em cada vaso depois de cada cultivo.

As variações observadas nos dados de quantidade de fósforo renovada refletiram os efeitos dos tratamentos e dos cultivos. À semelhança dos dados de produção de matéria seca, verificou-se decréscimo no teor de fósforo renovado do primeiro para os demais cultivos, principalmente nos tratamentos constituídos pela associação dos materiais de solo TM-14, TM-56, AP-Cl3 e TM-67 com as menores doses de fósforo aplicadas. Da mesma forma que para a matéria seca, verificou-se, do primeiro para os demais cultivos, decréscimo acentuado na quantidade de fósforo removida. Esse decréscimo pode ser atribuído à remoção, pelo vegetal, do fósforo adicionado, diminuindo seu efeito residual, bem como às variações ambientais nas diferentes épocas de condução dos ensaios. Outro fator que pode ser responsável, em parte, pelas variações observadas é a redução da disponibilidade do fosfato adicionado com o tempo. Quando há adição de fertilizante fosfatado ao solo, ocorre, segundo BARROW (1980), uma reação do fósforo na fase líquida com o fósforo na fase sólida, em dois estádios. No primeiro, o fósforo é adsorvido (etapa rápida); posteriormente, em etapa desenvolvida mais lentamente, parte do fosfato é convertida em forma mais firmemente retida. A segunda etapa da reação é atribuída à formação de estrutura tipo anel, em que há estabelecimento de ligação coordenada entre dois oxigênios do grupo fosfato e dois íons metálicos. Esse tipo de estrutura foi sugerido por ATKINSON *et alii* (1974) para a adsorção de fosfato em goethita e confirmado por PARETT *et alii* (1975) mediante análise por infravermelho. O fosfato

QUADRO 21 - Teor de fósforo na matéria seca de milheto, em cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material do solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Teor de fósforo em cada cultivo				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
		kg/ha	%				
Acd	TM-5	60	0,10	0,14	0,10	0,10	0,10
		120	0,23	0,13	0,11	0,12	0,11
		240	0,19	0,24	0,14	0,15	0,14
		360	0,54	0,29	0,16	0,19	0,18
LEda	TM-6	50	0,22	0,17	0,11	0,13	0,12
		100	0,23	0,18	0,12	0,12	0,13
		200	0,43	0,20	0,16	0,15	0,13
		300	0,19	0,35	0,20	0,20	0,17
LEda	TM-18	70	0,13	0,14	0,11	0,11	0,10
		140	0,26	0,17	0,11	0,13	0,12
		280	0,46	0,27	0,15	0,17	0,15
		420	0,97	0,37	0,19	0,20	0,19
LEdr	TM-42	60	0,14	0,11	0,10	0,10	0,10
		120	0,22	0,13	0,10	0,10	0,10
		240	0,31	0,22	0,11	0,12	0,10
		360	0,61	0,30	0,15	0,14	0,14
LEdr	TM-14	120	0,13	0,11	0,12	0,07	0,08
		240	0,29	0,13	0,08	0,10	0,10
		360	0,31	0,14	0,10	0,12	0,11
		480	0,30	0,18	0,11	0,13	0,13
LVar	TM-50	120	0,09	0,11	0,05	0,05	0,05
		240	0,16	0,11	0,07	0,09	0,08
		360	0,21	0,17	0,10	0,10	0,11
		480	0,33	0,18	0,11	0,12	0,12
LEdr	AP-013	50	0,20	0,11	0,12	0,11	0,07
		200	0,12	0,10	0,14	0,11	0,13
		300	0,15	0,14	0,14	0,15	0,10
		520	0,19	0,14	0,11	0,10	0,16
LVar	TM-67	160	0,10	0,09	0,06	0,06	0,06
		320	0,17	0,10	0,09	0,09	0,09
		480	0,26	0,18	0,11	0,12	0,10
		640	0,31	0,21	0,12	0,13	0,12

QUADRO 22 - Quantidade de fósforo removida depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Fósforo removido após cada cultivo				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
		kg/ha			kg/ha		
AQd	TM-5	60	8,51	2,00	3,45	1,30	2,04
		120	12,72	6,12	7,66	5,09	3,93
		240	23,56	9,88	11,17	12,87	9,50
		360	35,74	15,44	17,95	21,33	13,75
LEdm	TM-6	50	12,69	6,91	8,31	3,55	4,68
		100	17,88	10,30	9,53	7,60	6,51
		200	29,92	17,87	16,49	14,73	10,96
		300	49,75	21,76	27,25	23,74	16,76
LEdm	TM-18	70	12,90	7,53	4,17	3,14	2,91
		140	19,29	11,68	7,93	7,93	6,13
		280	34,23	18,76	15,10	16,91	12,07
		420	54,55	28,11	22,21	22,71	19,07
LEdr	TM-12	60	13,46	7,13	3,13	4,06	4,50
		120	26,83	12,83	6,40	5,29	6,60
		240	40,90	25,44	14,70	8,16	7,68
		360	79,29	38,06	29,79	15,12	12,92
LEdr	TM-14	120	13,62	3,80	1,84	1,13	1,44
		240	23,06	8,10	4,29	2,70	3,07
		360	40,16	12,03	11,05	6,44	6,11
		480	38,43	15,42	16,27	10,43	9,66
LVar	TM-56	170	11,27	2,40	0,54	0,66	0,68
		340	25,28	3,61	1,50	1,70	1,54
		510	40,68	13,16	3,66	3,47	5,55
		680	60,36	20,51	16,55	8,27	7,62
LEdr	AP-C13	52	9,86	1,70	2,03	2,31	1,05
		208	15,98	5,30	4,34	1,71	3,10
		390	28,05	5,91	3,84	4,42	8,45
		520	37,16	9,08	2,95	6,86	13,59
LVar	TM-67	160	10,90	1,71	0,70	0,60	0,82
		320	27,11	9,02	2,00	2,20	2,53
		480	47,34	14,98	6,09	6,44	5,40
		640	67,00	21,02	12,67	10,12	8,90
Média			30,25	12,33	9,05	7,60	6,86
		DMS _{0,05} - cultivos					0,23
		DMS _{0,05} - interação tratamentos x cultivos					1,34

retido nessa forma tem sido denominado não-lábil (HINGSTON et alii, 1974), em razão da sua reduzida disponibilidade. Diante da relação estabelecida entre adsorção de fósforo e goethita (Quadro 8), ocorreram, possivelmente, durante o período de condução dos ensaios, as etapas da reação de adsorção descritas. Embora HINGSTON et alii (1974) tenham verificado irreversibilidade completa do fosfato adsorvido à goethita, PARFITT (1979a) verificou que a disponibilidade de fósforo associado a esse material aumenta conforme a saturação na sua superfície.

Comparativamente, foi menor o decréscimo na quantidade de fósforo removida, do primeiro para o segundo cultivo, nos tratamentos constituídos pelos materiais de solo caoliniticos, com baixo teor de goethita e sem gibbsita (TM-5, TM-6, TM-18 e TM-42) (Quadro 22). Por outro lado, em relação à capacidade máxima de adsorção (Quadro 5), deve ter sido obtida maior saturação da superfície adsorvente nesses materiais que nos demais, sob o efeito das doses de fósforo aplicadas. Assim, a maior extração de fósforo no primeiro cultivo e as diferenças associadas aos materiais de solo e aos níveis de adubação refletem a maior disponibilidade inicial desse nutriente, bem como a natureza da ligação formada entre a superfície adsorvente e o íon fosfato.

Parece razoável admitir que em cada cultivo foi removido o fósforo mais frouxamente retido e que essa remoção deve ter-se processado com dificuldade crescente nos sucessivos cultivos.

Os dados do Quadro 22 foram utilizados no cálculo das quantidades de fósforo acumuladas, que constituem o Quadro 23. Os dados constantes desse quadro foram relacionados com os teores de fósforo obtidos pelos extratores e com os fatores quantidade e capacidade tampão.

4.2.2. Teores de Fósforo Disponível

Depois de cada cultivo foram analisados os materiais de solo, de acordo com as diversas doses de adubação fosfatada, obtendo-se os teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 (Quadros 24 e

QUADRO 23 - Quantidade de fósforo acumulada removida depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Fósforo removido após cada cultivo				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
kg/ha							
A3I	TM-5	50	8,51	11,31	11,86	15,25	18,29
		100	12,72	18,04	20,50	31,59	35,52
		250	21,50	31,43	44,61	57,48	66,98
		500	45,74	51,13	60,13	90,45	104,21
LEdm	TM-5	50	12,09	19,00	27,91	31,56	36,14
		100	17,98	26,38	37,81	45,41	51,92
		200	29,92	47,79	64,26	79,01	89,97
		300	49,75	74,51	101,76	125,59	142,26
LEdm	TM-18	50	12,00	20,43	21,60	27,74	30,65
		100	19,29	30,97	38,90	46,88	53,01
		250	34,23	52,09	68,09	85,03	97,97
		420	54,55	82,66	104,87	127,58	146,65
LEdr	TM-42	50	13,46	20,39	23,72	27,78	32,28
		100	26,51	39,66	46,06	51,25	57,95
		240	40,90	66,32	81,04	89,20	96,88
		360	79,29	117,35	147,14	162,26	175,18
LEdr	TM-14	120	13,62	17,42	19,26	20,39	21,83
		240	23,68	31,18	35,47	38,17	41,24
		360	40,16	52,19	63,24	69,66	75,79
		480	58,43	73,85	90,12	105,55	120,21
LVar	TM-56	170	11,27	13,67	14,21	14,87	15,55
		340	25,28	28,29	30,39	32,09	33,63
		510	40,08	51,24	56,90	60,37	65,92
		680	60,56	80,87	91,42	99,69	107,31
LEdr	AP-C15	52	9,86	11,56	13,59	15,90	18,05
		208	15,93	21,28	25,62	27,33	30,43
		390	28,05	33,95	37,80	42,22	50,67
		520	37,16	46,24	49,26	56,06	60,65
LVar	TM-67	160	10,90	17,51	13,31	14,00	14,82
		320	23,11	36,13	30,43	40,23	42,86
		480	47,34	62,32	68,41	74,85	80,25
		640	67,00	91,02	103,69	113,81	122,71

QUADRO 24 - Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1, depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Fósforo disponível após cada cultura				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
		kg/ha	mg/g				
AQI	TM-5	60	14,8	12,0	12,1	11,8	11,7
		120	29,8	25,6	21,4	19,3	16,7
		240	77,6	66,1	56,6	46,9	39,3
		360	119,2	105,7	82,7	69,9	56,1
LEda	TM-6	50	18,2	16,4	14,4	13,0	11,8
		100	29,2	25,1	19,8	17,5	14,4
		200	68,2	54,9	39,4	29,3	23,2
		300	93,5	77,5	61,2	45,8	31,6
LEda	TM-18	70	16,1	12,9	12,1	11,5	10,6
		140	33,1	24,9	21,0	17,5	13,2
		280	83,4	66,7	55,2	41,6	29,2
		420	107,8	99,3	79,6	61,3	49,3
LEdr	TM-42	60	11,8	8,7	8,9	8,2	6,8
		120	20,1	14,4	11,9	10,0	8,1
		240	42,1	28,6	20,6	14,9	10,9
		360	78,3	56,1	32,7	22,9	17,0
LEdr	TM-14	120	5,5	4,3	4,2	3,9	3,4
		240	12,1	9,5	8,9	8,2	6,5
		360	21,0	16,8	13,9	10,9	8,3
		480	31,9	26,5	18,9	16,1	13,2
LVar	TM-56	170	2,5	2,3	2,1	2,1	1,9
		340	4,9	4,3	4,1	3,8	3,4
		510	9,0	7,4	6,2	6,2	4,9
		680	12,6	10,9	9,8	8,7	7,1
LEdr	AP-CT3	52	5,4	5,0	5,3	5,3	4,9
		208	10,1	9,2	8,6	8,1	7,1
		390	15,4	14,8	13,9	13,1	11,0
		520	21,7	20,2	18,3	17,9	12,7
LVar	TM-67	160	3,0	2,7	2,6	2,8	2,9
		320	7,1	6,0	5,6	5,5	4,9
		480	11,5	10,7	9,1	8,6	7,6
		640	18,2	16,7	13,6	12,1	10,1
DMS _{0,05} - interação tratamentos x cultivos						1,4	

25). Os tratamentos aplicados determinaram alterações nos teores de fósforo disponível variáveis entre cultivos. Para a menor quantidade de fósforo aplicada, à exceção dos materiais de solo TM-6, TM-18 e TM-42, verificou-se, a partir do segundo cultivo, tendência de estabilização do teor de fósforo obtido pelo extrator Mehlich 1 (Quadro 24). Para o extrator Bray 1, esse comportamento foi também observado, exceto nos materiais TM-6 e TM-18 (Quadro 25). As produções de matéria seca e o fósforo absorvido, com as doses referidas, foram diferentes na maioria dos materiais de solo, principalmente do segundo para o terceiro cultivo. Situação semelhante foi também verificada por NOVAIS (1977): a constância nos teores de fósforo disponível estava associada à absorção de reduzida quantidade de fósforo. Não foi verificado por esse autor o fato de que o extrator não se mostrou sensível à remoção de quantidade apreciável de fósforo, como, por exemplo, no material TM-42, com a dose de 60 kg de P/ha (Quadros 22, 24 e 25). Assim, podem-se verificar duas situações distintas. Na primeira ocorre estabilidade dos teores de fósforo disponível e a absorção de fósforo é reduzida, o que sugere a remoção de fósforo não-lábil pelo extrator. Na segunda há fósforo lábil, uma vez que há absorção apreciável, e o extrator não indica a variação devida à absorção. As duas situações caracterizam o fato de que os dois extratores químicos removem, ao lado do fósforo lábil, apreciável quantidade de fósforo não-lábil. Esse fato é bem caracterizado na amostra AP-C13. A amostra inicial apresentou 5,1 e 6,4 $\mu\text{g/ml}$ de fósforo, obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, respectivamente (Quadro 5). Como se trata de material de solo com elevada capacidade tampão, esperava-se que esses níveis de fósforo disponível assegurassem a manutenção de produções razoáveis de matéria seca e razoáveis teores de fósforo absorvido durante os cultivos. No entanto, com a dose de 52 kg de P/ha, obteve-se, no primeiro cultivo, pequena produção de matéria seca e, em consequência, reduzida quantidade de fósforo absorvida. Nos demais, esses valores foram ainda menores, permanecendo os teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, praticamente inalterados (Quadros 20, 22, 24 e 25). Diante desse resultado, os valores do fator quantidade obtidos para

QUADRO 25 - Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Bray 1, depois de cada cultivo, de acordo com as doses de fósforo aplicadas em cada material de solo (média de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada	Fósforo disponível após cada cultivo				
			1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
		kg/ha	$\mu\text{g/g}$				
Aqsl	TM-5	60	18,9	18,3	17,5	17,6	17,4
		120	37,9	34,8	27,9	25,9	22,8
		240	80,2	72,5	61,7	53,1	48,0
		360	119,8	113,4	90,0	82,1	70,8
LEdm	TM-6	50	19,6	18,9	16,5	15,9	14,5
		100	30,1	29,1	24,3	21,1	18,3
		200	62,3	56,6	42,5	34,7	30,9
		300	89,9	79,7	58,4	48,0	40,5
LEdm	TM-18	70	22,0	18,9	17,9	16,5	15,8
		140	40,5	35,2	28,0	25,5	23,6
		280	85,7	71,5	60,7	48,8	42,9
		420	120,6	108,6	93,5	66,6	64,5
LEdr	TM-42	60	10,7	8,1	8,4	8,9	8,3
		120	17,3	13,8	11,1	10,1	9,3
		240	30,0	23,6	19,7	16,5	14,3
		360	54,8	40,7	30,5	24,4	19,6
LEdr	TM-14	120	9,8	8,1	8,4	8,2	8,2
		240	20,6	19,3	17,6	15,6	15,2
		360	36,0	31,9	27,9	25,2	23,6
		480	51,4	45,0	39,9	36,7	33,5
LVar	TM-56	170	7,6	6,5	5,9	6,8	6,4
		340	16,0	13,3	12,9	13,1	12,0
		510	27,0	22,8	20,6	20,0	17,4
		680	33,7	30,7	28,3	27,5	25,5
LEdr	AP-C13	52	9,8	8,9	9,2	9,1	8,7
		208	16,8	14,2	14,2	13,8	13,1
		390	26,9	23,4	22,9	21,9	19,6
		520	35,0	31,4	29,5	28,1	25,1
LVar	TM-67	160	8,6	7,9	7,4	8,2	8,3
		320	19,8	17,6	16,1	16,0	14,5
		480	30,3	27,8	26,4	24,3	21,8
		640	44,4	41,2	35,4	31,9	29,0
DES _{0,05} - interação tratamentos x cultivos						1,3	

esse material (Quadro 12) não indicam somente a presença de fósforo lábil, sendo constituído, como sugerido, de alta proporção de fósforo não-lábil, provavelmente associado à goethita.

Dentro de cada cultivo, foi estabelecida a relação entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1. Observou-se tendência de maior decréscimo nos teores obtidos pelo extrator Mehlich 1 entre cultivos, em relação aos teores obtidos pelo extrator Bray 1. Para verificar se a variação observada nos coeficientes da regressão (interseção e linear) dos teores obtidos pelos extratores Mehlich 1 (Y) e Bray 1 (X) eram diferentes estatisticamente entre cultivos, utilizou-se o seguinte modelo:

$$Y_i = a_0 + a_1 X_1 + a_2 D_1 X_1 + a_3 D_2 X_1 + a_4 D_3 X_1 + a_5 D_4 X_1 + a_6 D_1 + a_7 D_2 + a_8 D_3 + a_9 D_4 + e_i, \text{ em que .}$$

Y_i é o teor de fósforo disponível obtido pelo extrator Mehlich 1

X_1 é o teor de fósforo disponível obtido pelo extrator Bray 1

D_1, D_2, D_3 e D_4 são variáveis "dummy", com valor 0 para o primeiro cultivo; $D_1 = 1$ e as demais iguais a zero para o segundo cultivo; $D_2 = 1$ e as demais iguais a zero para o terceiro cultivo; $D_3 = 1$ e as demais iguais a zero para o quarto cultivo e $D_4 = 1$ e as demais iguais a zero para o quinto cultivo.

a_0, a_6, a_7, a_8 e a_9 são os coeficientes de interseção

a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 são os coeficientes lineares

e_i é uma variável aleatória, normalmente distribuída, com média zero e variância σ^2 .

De várias seleções efetuadas, obteve-se a seguinte equação de regressão, em que apenas foi significativa a inclusão do coeficiente a_4 , relativo ao quinto cultivo:

$$Y = -6,39 + 0,93^{**}X_1 - 0,12^{**}D_4 X_1, \text{ com } R^2 = 0,920^{**}$$

O modelo ajustado evidenciou a existência de duas populações distintas, englobando a primeira os dados até o quarto cultivo e a segunda os dados do quinto cultivo. O sinal negativo no coeficiente da variável "dummy" indica menor declividade da reta obtida com os dados do quinto cultivo. Assim, a relação entre os teores de fósforo disponível pelos extratores Mehlich 1 (Y) e Bray 1 (X) pode ser expressa por

$$Y = -6,87 + 0,99X, \text{ com } R^2 = 0,920^{**}, \text{ para os quatro primeiros cultivos e}$$

$$Y = -4,10 + 0,79X, \text{ com } R^2 = 0,894^{**}, \text{ para o quinto cultivo.}$$

Os coeficientes lineares das regressões ajustadas sugerem a ocorrência de maior decréscimo dos teores de fósforo do extrator Mehlich 1, em relação ao Bray 1, dos quatro primeiros para o último cultivo. Admitindo que, a cada cultivo, permanece o fósforo retido mais fortemente e é absorvido o mais fracamente adsorvido, pode-se inferir que o extrator Mehlich 1 extraiu maior proporção de fósforo lábil, em relação ao não-lábil, que o extrator Bray 1. É possível que a fração de fósforo não-lábil extraída seja constituída, pelo menos parcialmente, de fosfatos de ferro. Esses fosfatos são extraídos, ao lado de fosfatos de alumínio, pelo extrator Bray 1 (THOMAS e PEASLEE, 1973; BAHIA FILHO e BRAGA, 1975b).

4.2.3. Fósforo Adsorvido, de acordo com os Fatores Quantidade e Capacidade Tampão

A influência dos fatores quantidade e capacidade tampão na absorção de fósforo foi avaliada por meio de regressões múltiplas, ajustadas com os dados obtidos. Nos ajustes, utilizaram-se, ainda, as diversas medidas de capacidade tampão determinadas (Quadros 9 e 18).

O fator quantidade empregado (fósforo adsorvido) foi responsável por cerca de 41% da variação observada no fósforo adsorvido pelo vegetal (Quadro 26). Possivelmente, se a medida utilizada fosse mais sensível na avaliação do fósforo lábil e não incluísse fósforo não-lábil, a regressão se

QUADRO 26 - Equações de regressão ajustadas entre fósforo absorvido, fatores quantidade, capacidade tampão e dose de fósforo aplicada^{1/}

Equações de regressão	Coefficientes de determinação R^2
$Y = 32,86 + 1,98^{**} Q$	0,406**
$Y = 44,13 + 2,35^{**} Q - 0,0336^{**} Ctm_1$	0,695**
$Y = 53,99 + 2,16^{**} Q - 50,68^{**} k$	0,708**
$Y = 50,99 + 2,12^{**} Q - 0,0336^{**} x_m$	0,528**
$Y = 44,34 + 2,33^{**} Q - 0,0397^{**} Cte$	0,692**
$Y = 44,72 + 2,19^{**} Q - 0,0122^{**} It$	0,660**
$Y = 45,39 + 2,31^{**} Q - 0,1739^{**} Ia$	0,577**
$Y = 40,64 + 2,70^{**} Q - 0,0339^{**} Ctm_2$	0,722**
$Y = 26,45 + 0,14^{**} P$	0,373**
$Y = 37,04 + 0,16^{**} P - 0,0352^{**} Ctm_1$	0,619**

1/ Y = fósforo absorvido (kg/ha)

Q = fósforo adsorvido (μg P/g)

Ctm_1 = capacidade tampão máxima nas amostras com adubação fosfatada (ml/g)

k = energia de adsorção (ml/ μg)

x_m = capacidade máxima de adsorção (μg P/g)

Cte = capacidade tampão de equilíbrio (ml/g)

It = índice tampão (ml/g)

Ia = índice de adsorção (μg P/g)

Ctm_2 = capacidade tampão máxima nas amostras sem adubação fosfatada (ml/g)

P = dose de P aplicada (kg/ha)

* = excede o nível de probabilidade de 5%.

** = excede o nível de probabilidade de 1%.

ria mais bem ajustada. A inclusão do fator capacidade no modelo aumentou significativamente seu poder preditivo. Em todas as regressões ajustadas, o coeficiente da regressão para capacidade tampão foi negativo, indicando que, para a mesma quantidade de fósforo adsorvido, a absorção desse nutriente decresceu conforme a capacidade tampão. Dentre os componentes da capacidade tampão, a energia (k) apresentou importância maior, em relação à adsorção máxima ($x_{\square}$), diante dos coeficientes de determinação obtidos pela inclusão dessas duas variáveis. O efeito negativo de k na disponibilidade de fósforo para o vegetal pode ser entendido como maior tendência de deslocamento do equilíbrio adsorção/dessorção para a fase sólida, como sugerido por HOLFORD e MATTINGLY (1976b). A energia de retenção depende, no entanto, da natureza da ligação estabelecida entre a superfície adsorvente e os íons fosfato. Nesse sentido, o efeito negativo da energia pode estar relacionado com a menor reversibilidade do fósforo adsorvido à superfície de goethita, por causa da ligação bidentada estabelecida.

Os resultados do efeito da capacidade tampão na absorção de fósforo confirmam a proposição de KHASAWNEH (1971) e os resultados de HOLFORD e MATTINGLY (1976b). Para esses pesquisadores, em dois ou mais solos com iguais quantidades de fósforo adsorvido a absorção de fósforo seria inversamente proporcional à capacidade tampão, uma vez que, quanto maior fosse o fator capacidade, menor seria a concentração de fósforo em solução. Esse princípio reflete, ainda, que, quanto maior for a capacidade tampão, menor será a facilidade de dessorção do fosfato adsorvido (HOLFORD e MATTINGLY, 1976a, b).

Os índices de capacidade tampão empregados foram praticamente equivalentes na sua contribuição à variância do fósforo absorvido (Quadro 26). A variação observada na capacidade tampão máxima conforme a adubação fosfatada não significou maior poder preditivo do modelo empregado, em relação aos valores iniciais de capacidade tampão (Quadro 9). É possível que esse fato esteja relacionado com a manutenção, na maioria dos casos, da mesma ordem de magnitude dos valores de capacidade tampão entre materiais de solo. Não há, assim, nesse caso, limitação à utilização da capacidade tam

pão máxima, quando há variação na energia de adsorção, como advertiu HOLFORD (1979).

Da mesma forma, os valores de capacidade tampão, variáveis conforme a concentração de fósforo em equilíbrio (capacidade tampão de equilíbrio), podem também ser utilizados, pois refletem com propriedade o fator capacidade. A separação de regiões de adsorção, mediante uma faixa de concentração de fósforo adicionado (índice tampão), não contribuiu para melhor estimativa da capacidade tampão. Sua única vantagem reside no emprego de menor concentração de fósforo adicionado, evitando-se a possível ocorrência de reações de precipitação. O índice de adsorção, calculado a partir de uma concentração de fósforo padrão (0,3 $\mu\text{g P/ml}$), integra, pela quantidade adsorvida, a energia e a capacidade de adsorção. Sua determinação, na concentração utilizada, evita também reações de precipitação. É de reduzida utilidade, no entanto, se empregado para calcular a quantidade de fósforo a adicionar aos solos, tendo em vista a variação no fator reposição.

Com relação ao fósforo adicionado, o efeito da capacidade tampão sobre a absorção foi semelhante ao verificado para o fósforo adsorvido (Quadro 26). Assim, para o mesmo nível de fósforo aplicado, a absorção decresceu com o aumento da capacidade tampão. Em outras palavras, para compensar esse efeito, é necessária, para a mesma quantidade de fósforo absorvida, a aplicação de maior dose de fósforo em solos com maior capacidade tampão. Esse princípio já havia sido estabelecido por BAHIA FILHO e BRAGA (1975a, b), que recomendaram aplicações de maior quantidade de adubo fosfatado em solos com maior capacidade tampão.

É previsível, no entanto, que o fornecimento de fósforo até a superfície das raízes seja processado a velocidade mais baixa nos materiais de solo com maior capacidade tampão. Influenciam esse comportamento a maior tendência de associação do fósforo à fase sólida e o menor coeficiente de difusão esperado nesses materiais. É possível que a influência do primeiro fator tenha sido incrementada pelo favorecimento da adsorção de fosfato, através da metodologia empregada de incorporação do fertilizante, de

controle de unidade efetuada e da maior temperatura ambiente, que, normalmente, é verificada em casa de vegetação. Por outro lado, a difusão pode ter sido facilitada, tendo em vista a exploração pelas raízes de volume limitado de material de solo, com conseqüente redução na distância a ser percorrida pelo íon fosfato até a superfície da raiz.

Pelo número de plantas empregado em cada cultivo (vinte plantas por vaso), é provável que tenha sido favorecida a absorção de fósforo nos materiais de solo de menor capacidade tampão. Nesse caso, a velocidade de reposição mais baixa em materiais com maior capacidade tampão limitaria a absorção de fósforo na condição de intenso crescimento.

4.2.4. Fósforo Absorvido, em relação a Fósforo Disponível e a Capacidade Tampão

A sensibilidade dos extratores químicos (Mehlich 1 e Bray 1) à capacidade tampão foi também avaliada mediante regressões múltiplas ajustadas para fósforo absorvido pelo vegetal e para esses parâmetros (Quadro 27). Por esse critério, os extratores químicos empregados foram sensíveis à capacidade tampão, uma vez que a inclusão desse fator no modelo matemático não determinou alterações significativas no coeficiente de determinação. Esses resultados estão de acordo com a sensibilidade verificada com o uso dos fatores quantidade e capacidade tampão, em relação ao fósforo disponível (Quadro 17). Confirmam também os resultados de HOLFORD (1980a, b) para o extrator Bray 1, classificado por esse autor como sensível. Para o extrator Mehlich 1, os resultados obtidos são o oposto dos encontrados por HOLFORD (1980a). Argumenta esse pesquisador que o extrator Mehlich 1 é insensível à capacidade tampão em solos com pH acima de 6,0, provavelmente pela dissolução de compostos de fósforo não-lábil. No presente caso, há evidências, já mencionadas, de que os extratores removem também fósforo não-lábil, em proporção maior, em relação ao lábil, no extrator Bray 1. Dessa forma, não parece ser esse o único fator determinante da sensibilidade à capacidade tampão, já que a exaustão do extrator pela argila também é fa -

tor importante nesse processo. Outro aspecto da sensibilidade é que os níveis críticos de fósforo disponível são também influenciados pela capacidade de tampão. A tendência sugerida por HOLFORD (1980b) é de que há menor variação desses níveis em solos com diferentes capacidades tampão, quando são utilizados extratores sensíveis. Essa tendência foi verificada pela determinação dos níveis críticos para os extratores utilizados, relacionando-se a produção relativa e os teores de fósforo disponível (Figuras 3 a 18).

QUADRO 27 - Equações de regressão ajustadas para fósforo absorvido (Y), teores de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 (M_1) e Bray 1 (B_1), e capacidade tampão máxima (C)

Equações de regressão	Coefficientes de determinação R^2
$Y = 36,87 + 0,91^{**}M_1$	0,524**
$Y = 38,16 + 0,89^{**}M_1 - 0,0017 C$	0,525**
$Y = 27,40 + 1,00^{**}B_1$	0,554**
$Y = 31,17 + 0,96^{**}B_1 - 0,0048 C$	0,557**

** Excede o nível de probabilidade de 1%.

A dispersão de pontos, principalmente nos materiais TM-14, TM-56, AP-C13 e TM-67, foi devida, em parte, ao efeito, já mencionado, da redução da disponibilidade de fósforo para o vegetal com o tempo. Esse efeito não foi indicado pelo extrator químico. Dessa forma, para teores de fósforo disponível bastante próximos, obtiveram-se diferentes valores de produção relativa. No primeiro cultivo, para o mesmo teor de fósforo disponível, a produção relativa foi superior às obtidas nos demais. A semelhança dos dados de produção de matéria seca e fósforo absorvido, esse comportamento foi verificado principalmente com os menores teores de fósforo disponível, que correspondem às menores doses empregadas do fertilizante fosfatado.

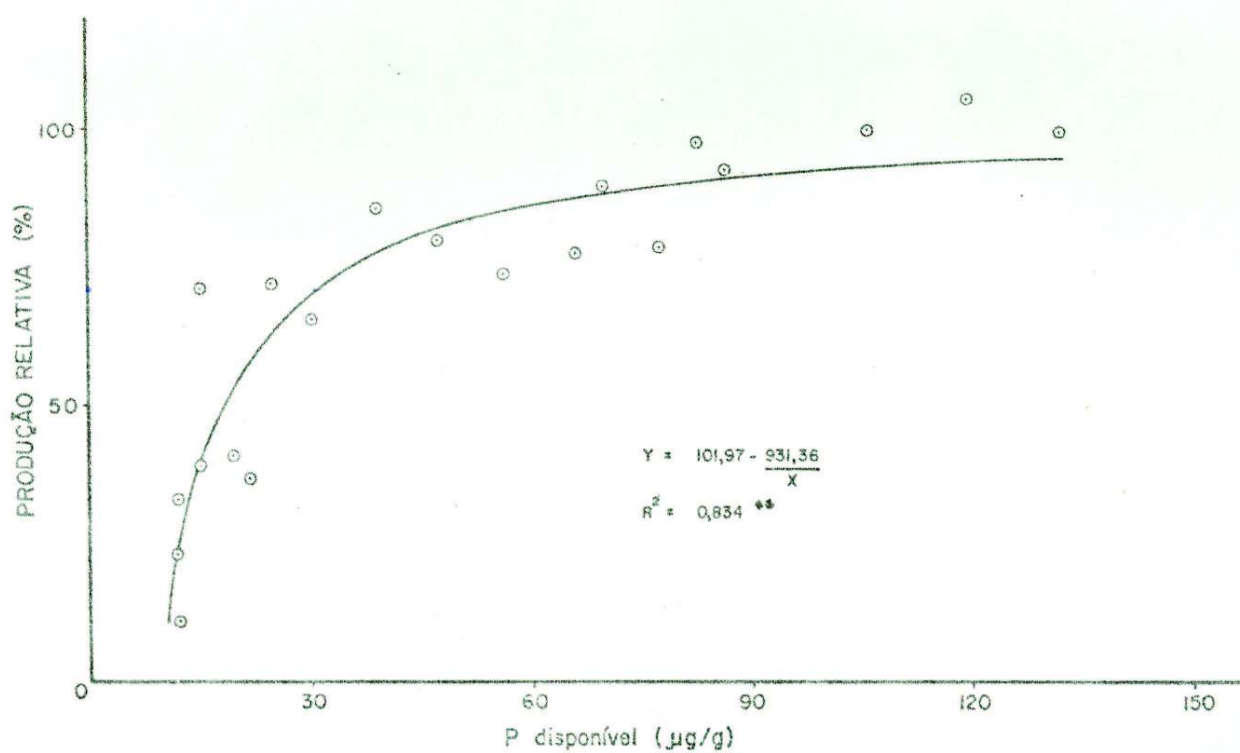


FIGURA 3 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-5).

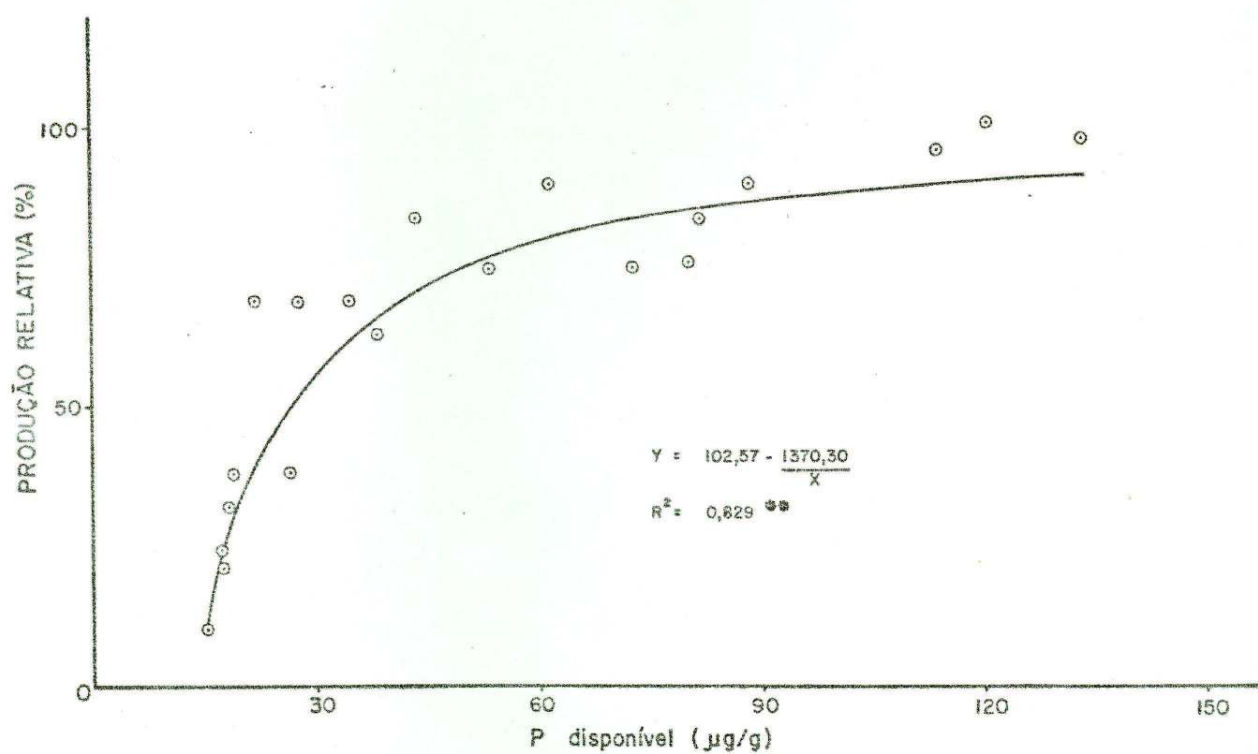


FIGURA 4 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-5).

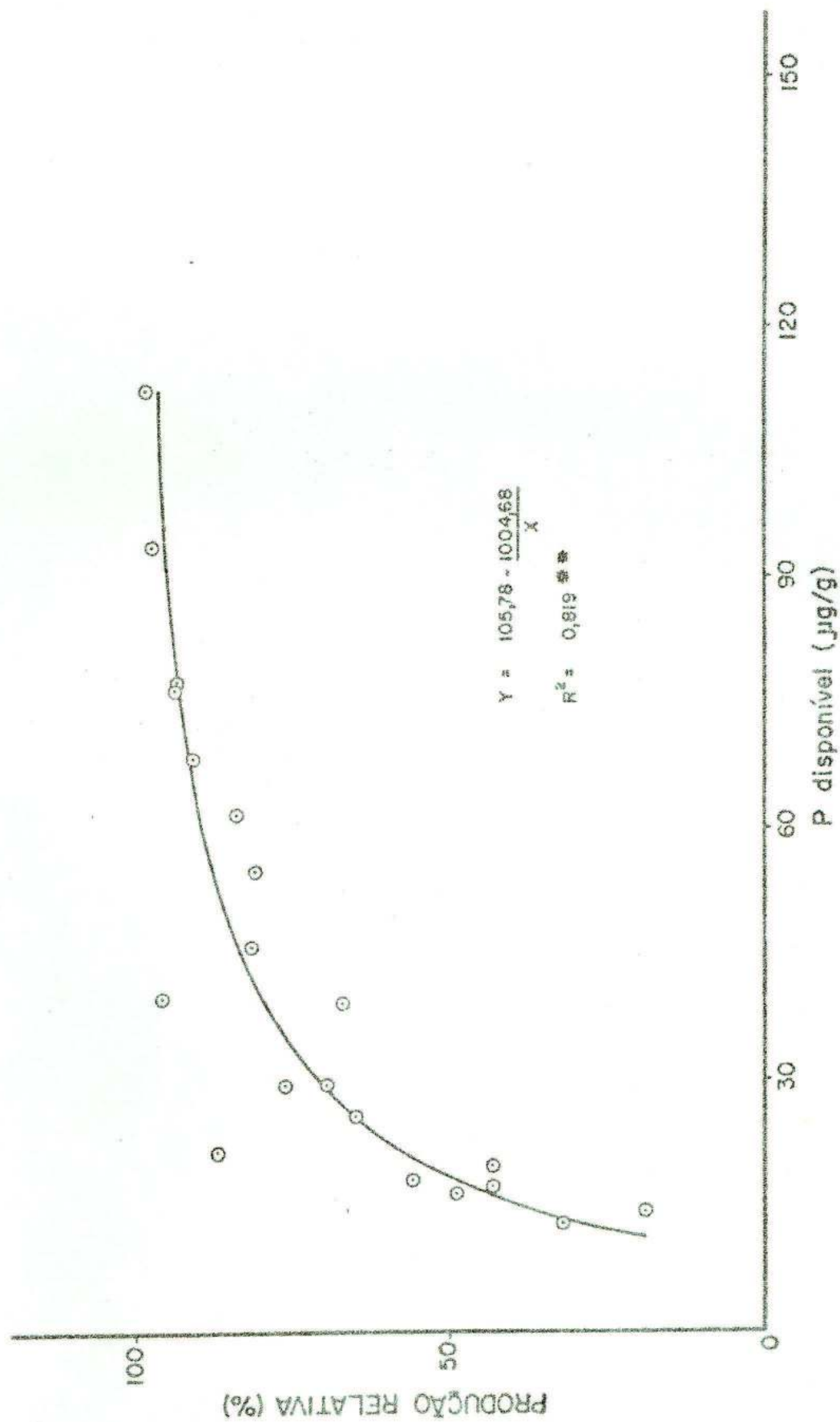


FIGURA 5 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-6).

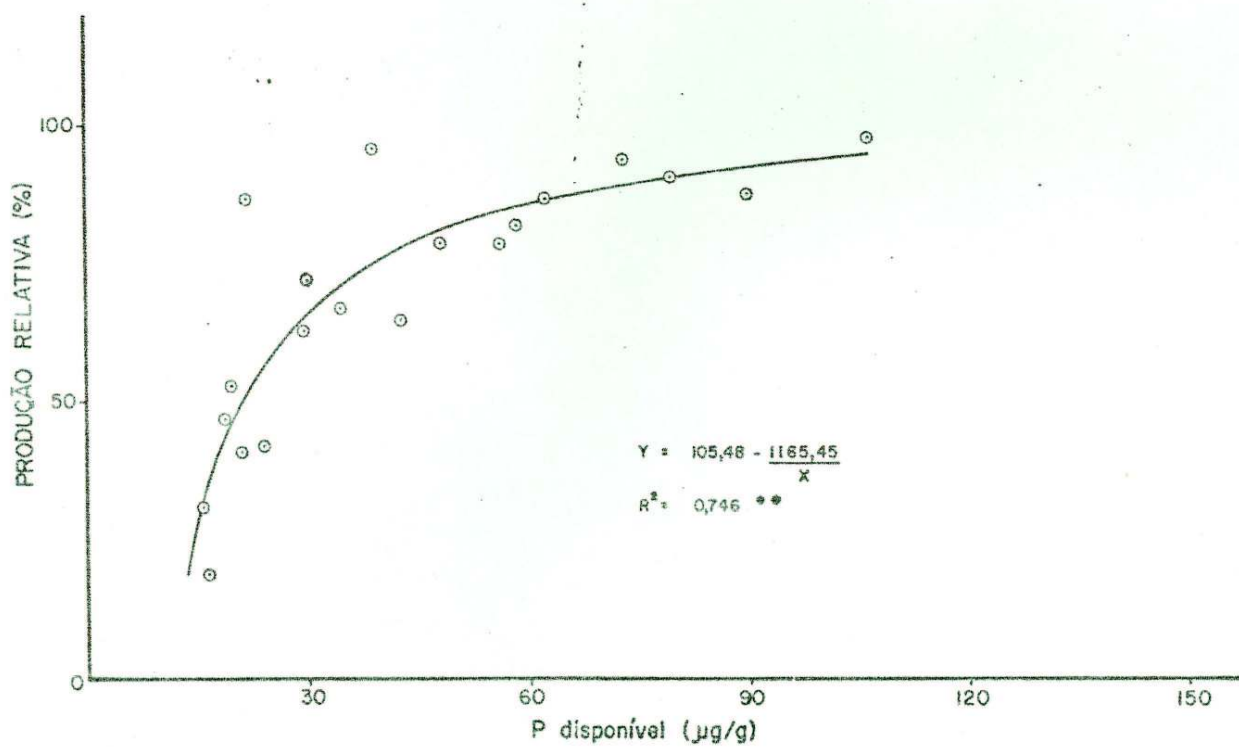


FIGURA 6 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-6).

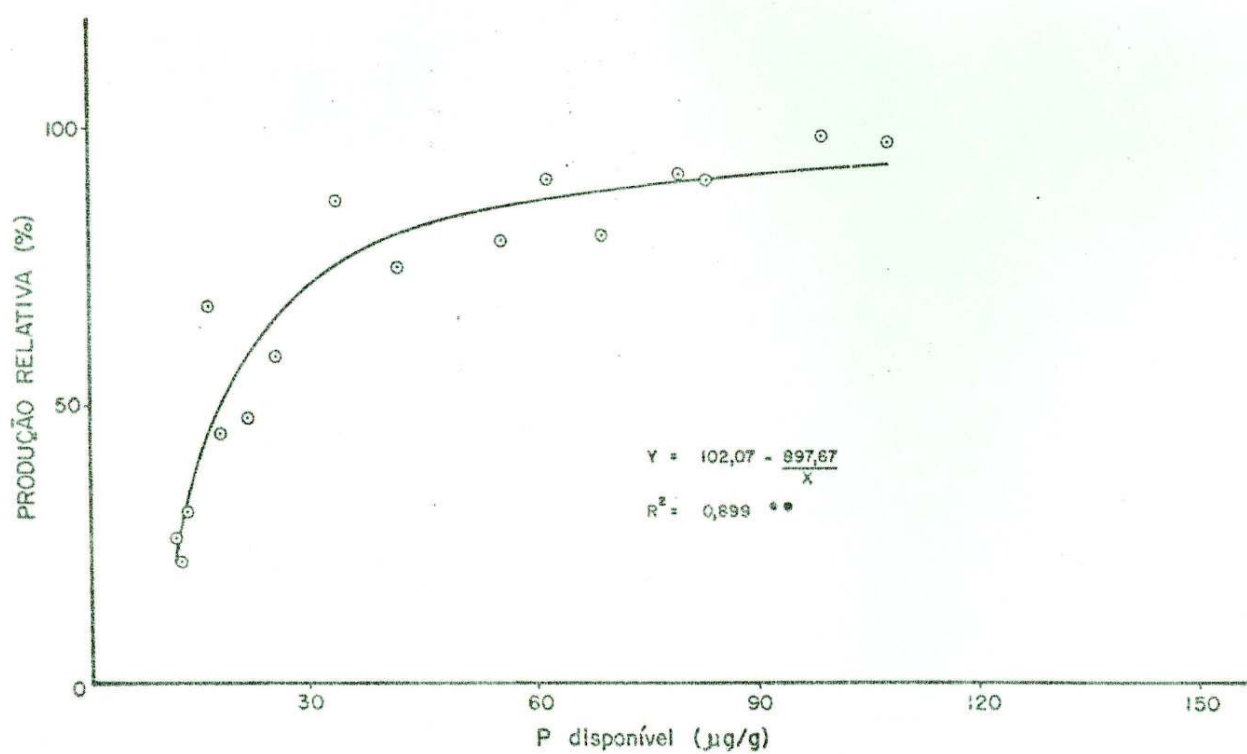


FIGURA 7 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-18).

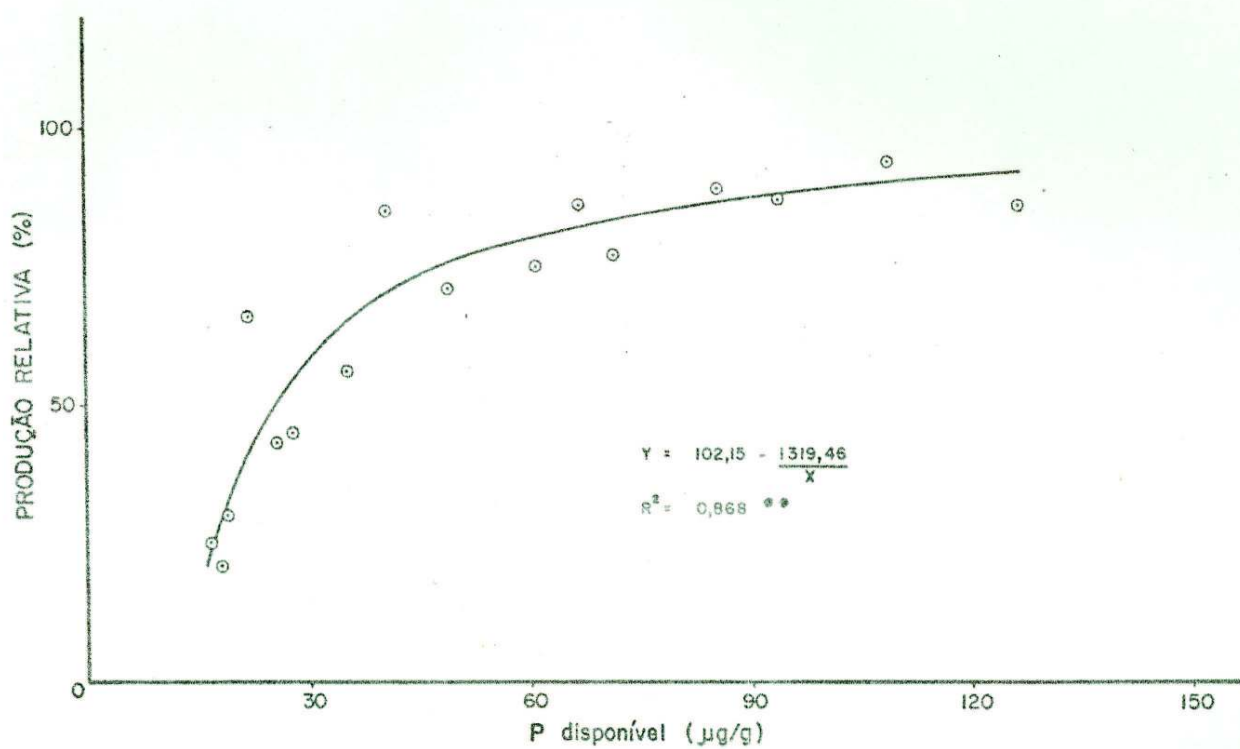


FIGURA 8 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-18).

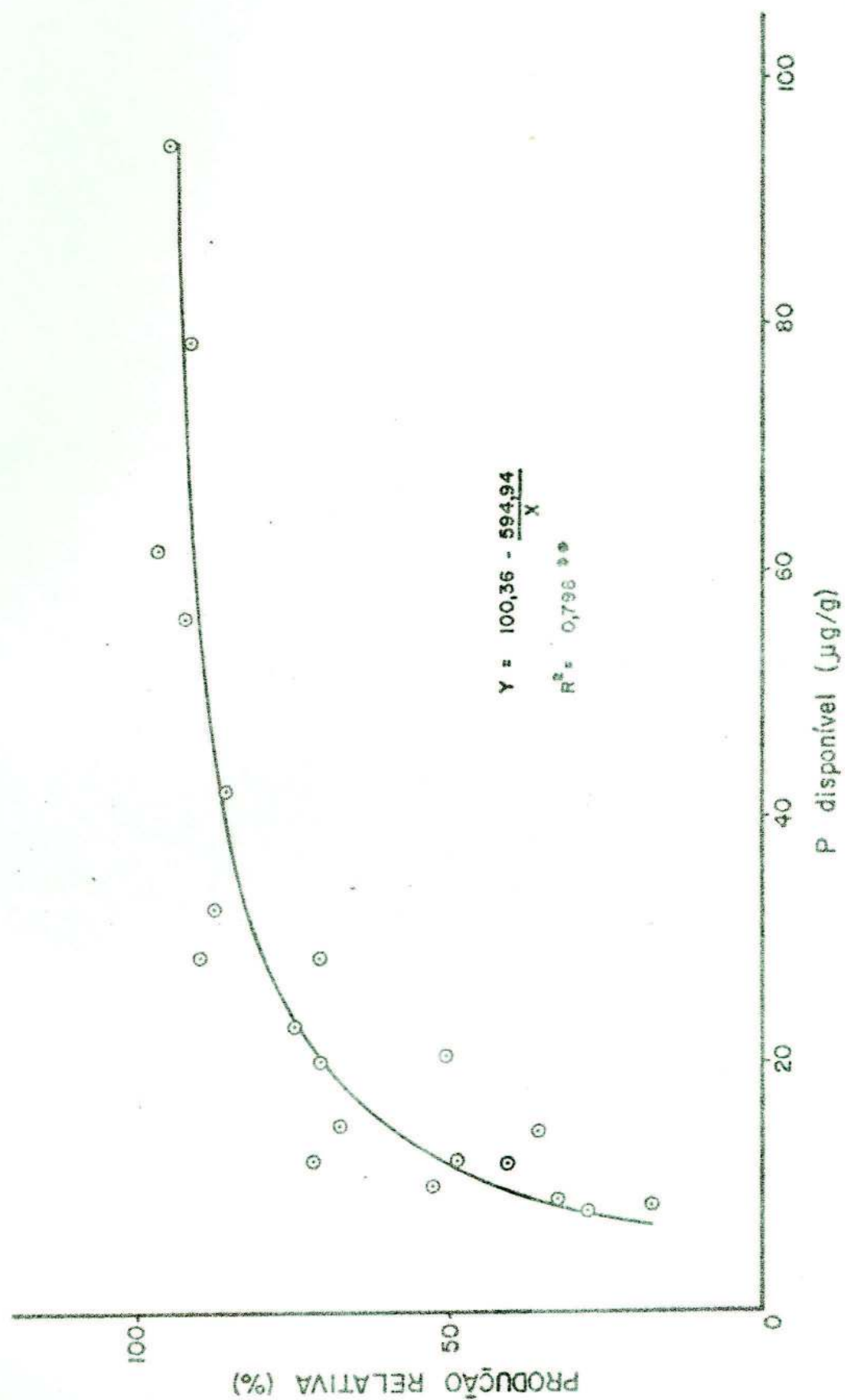


FIGURA 9 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-42).

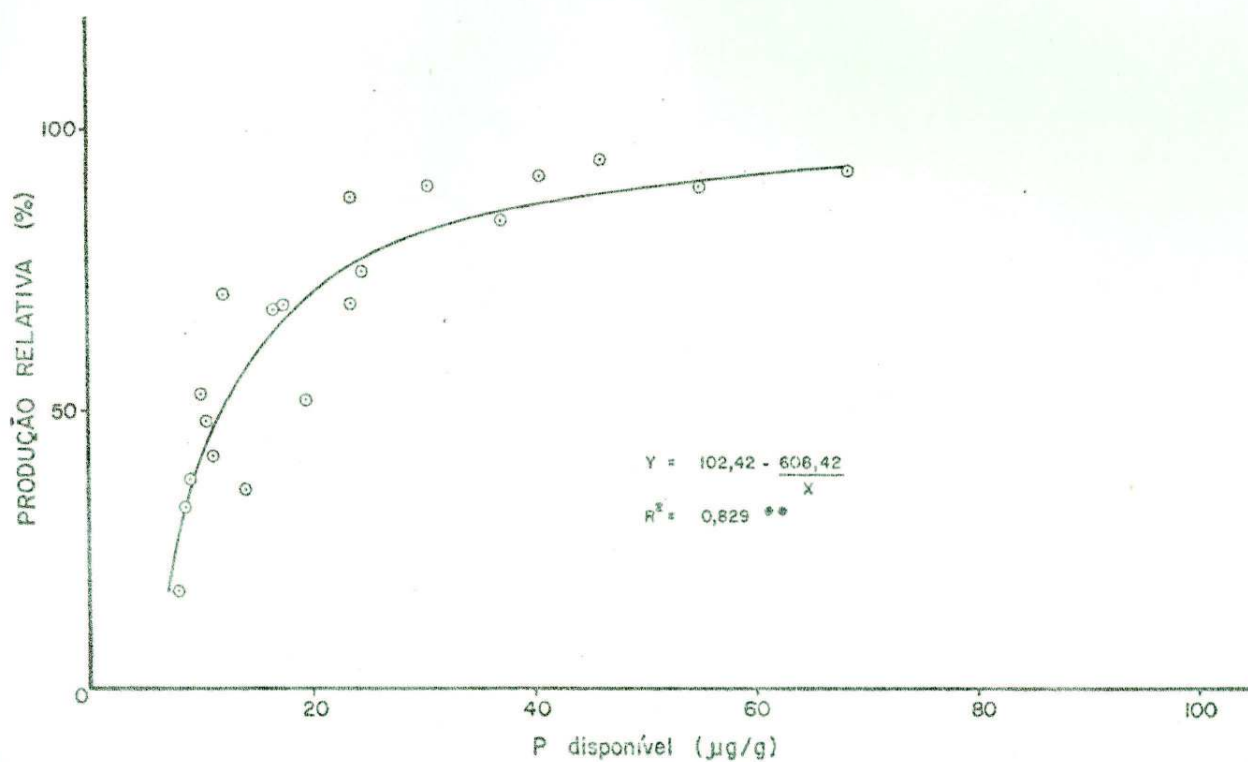


FIGURA 10 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-42).

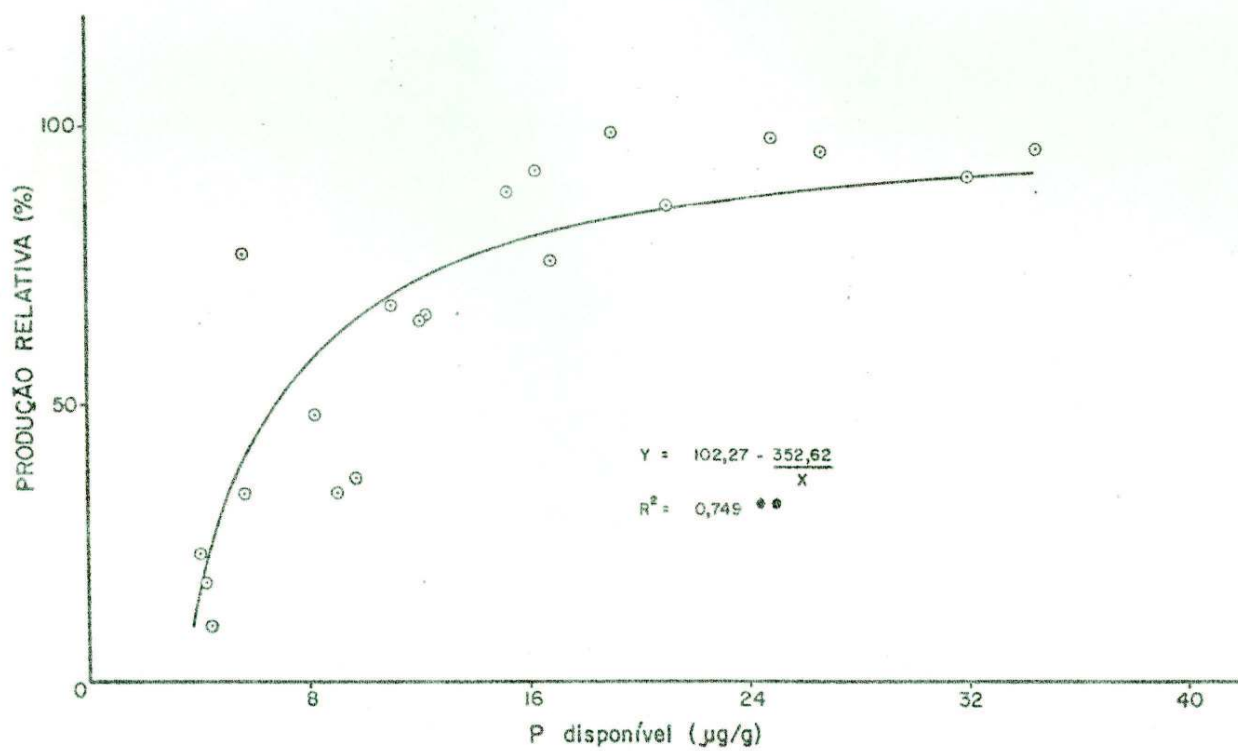


FIGURA 11 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-14).

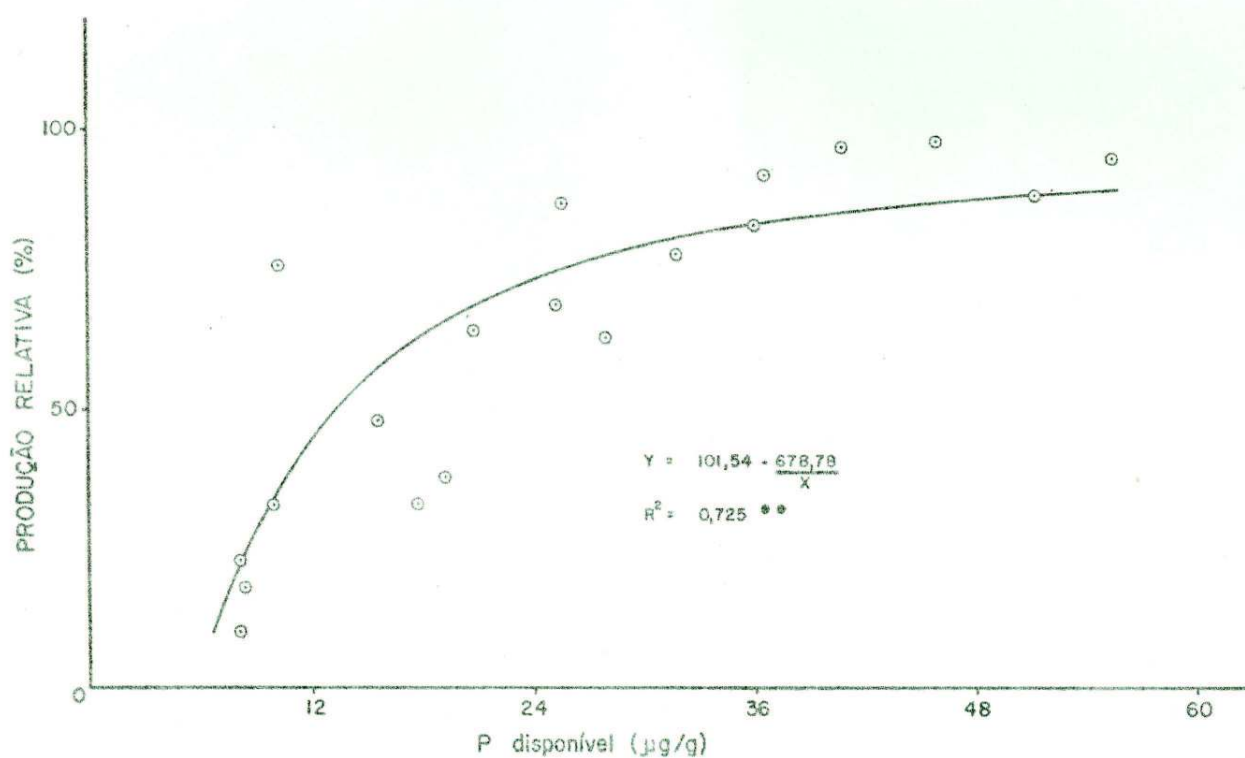


FIGURA 12 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-14).

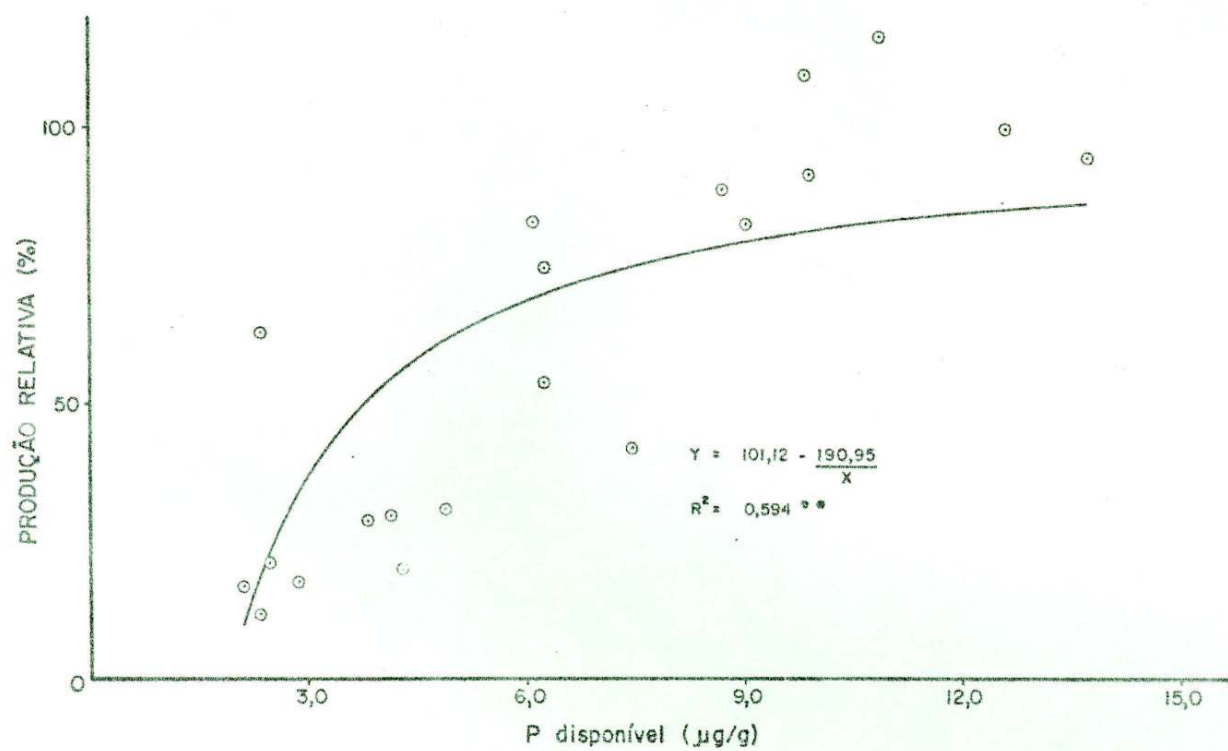


FIGURA 13 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich1 (Material de solo TM-56).

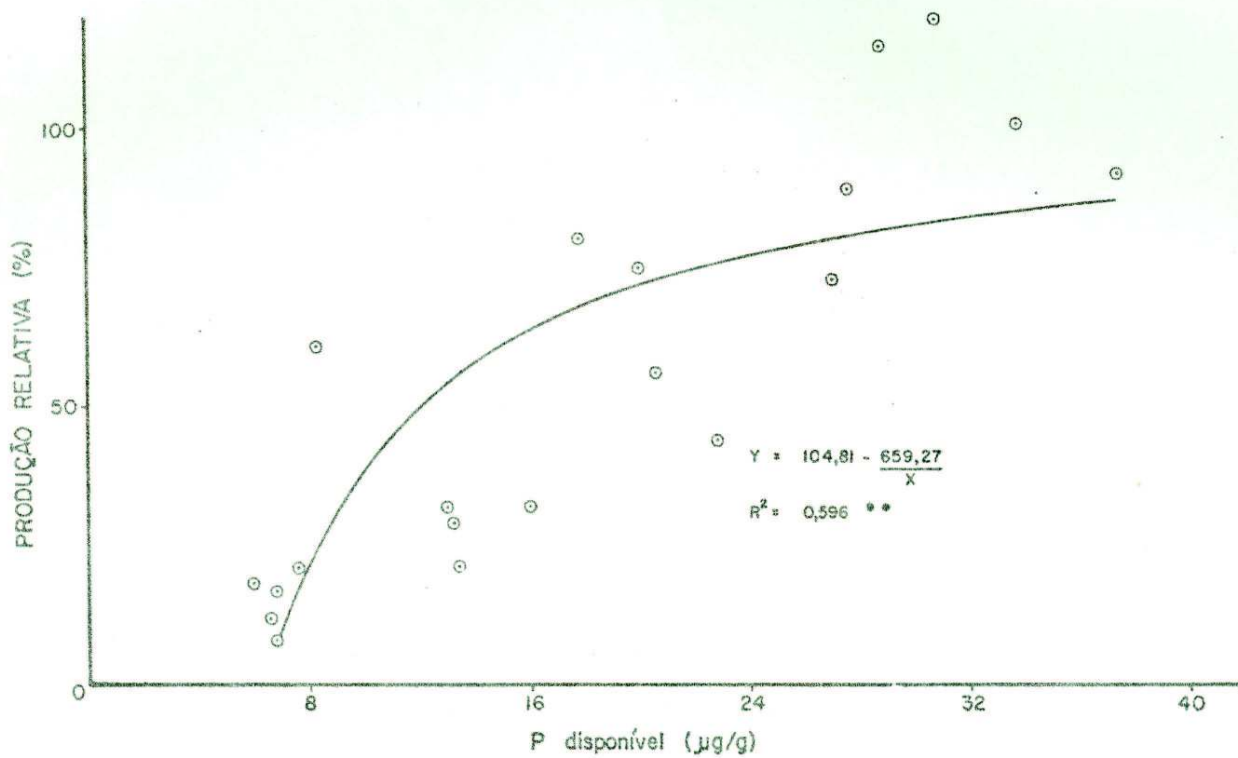


FIGURA 14 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo TM-56).

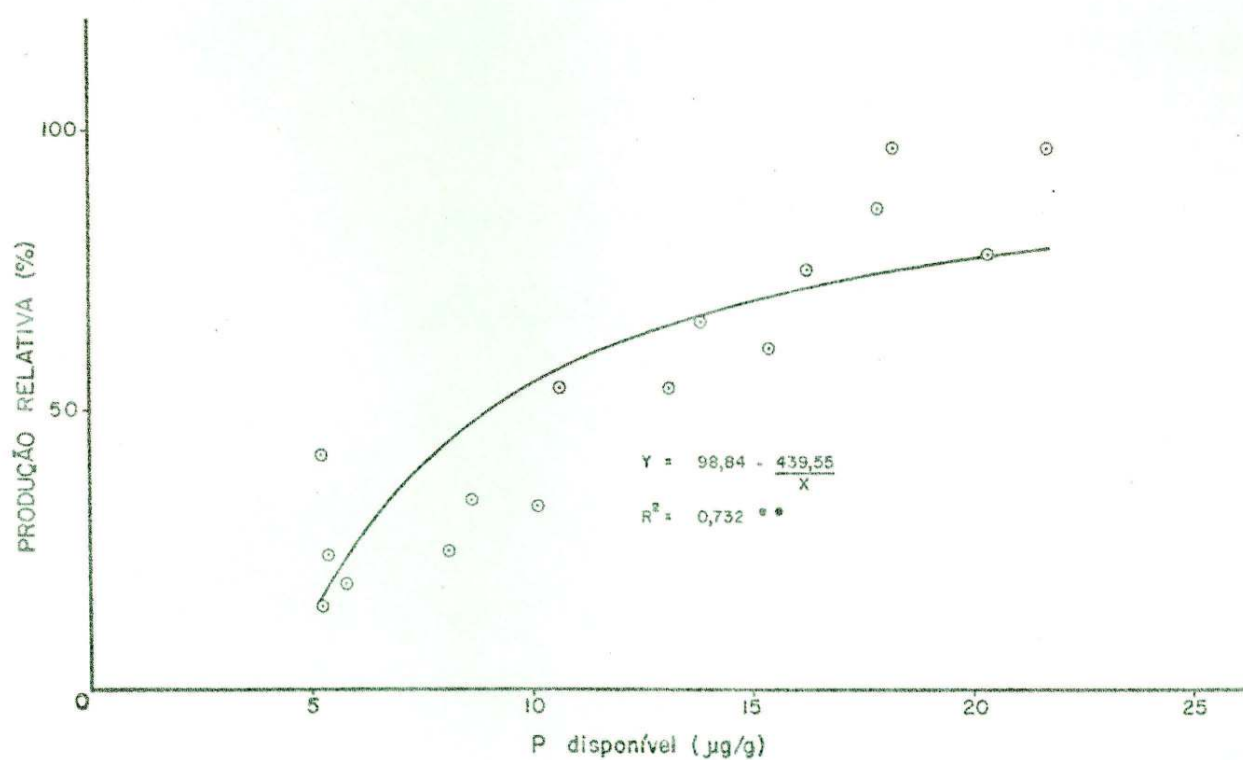


FIGURA 15 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo AP-C13).

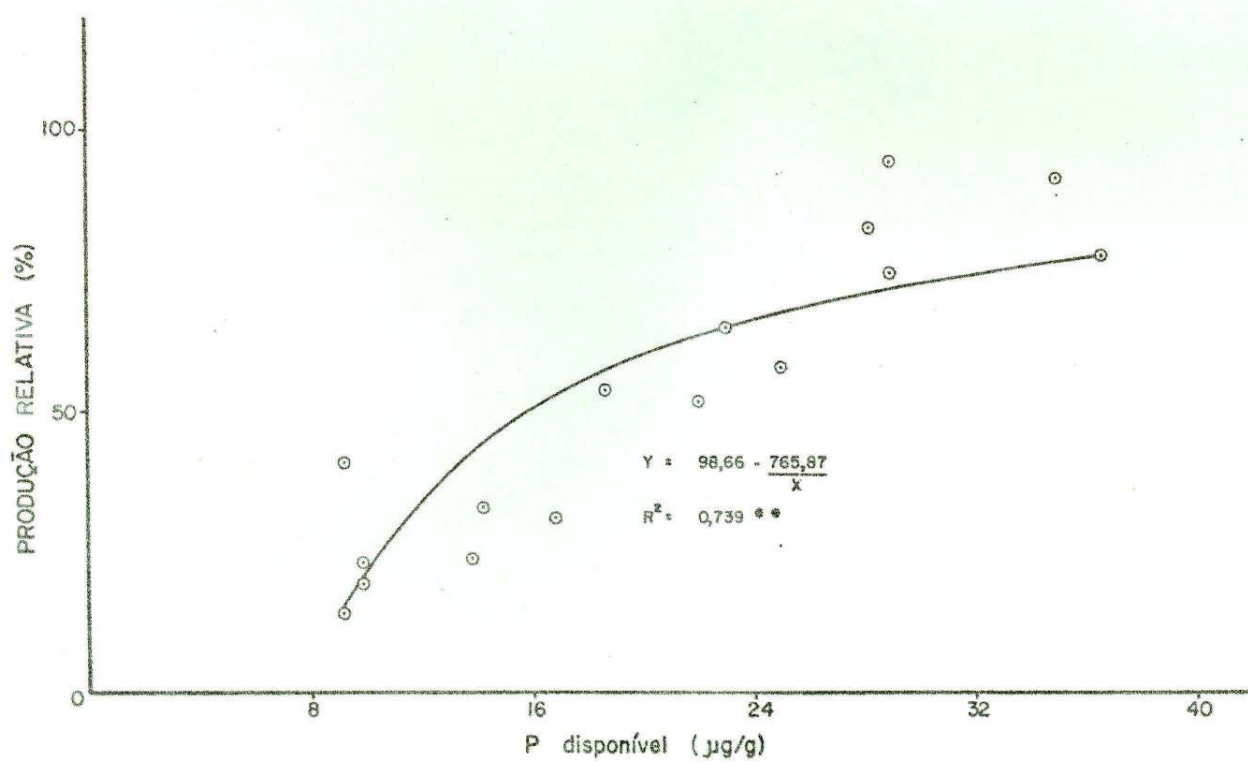


FIGURA 16 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Bray 1 (Material de solo AP-C13).

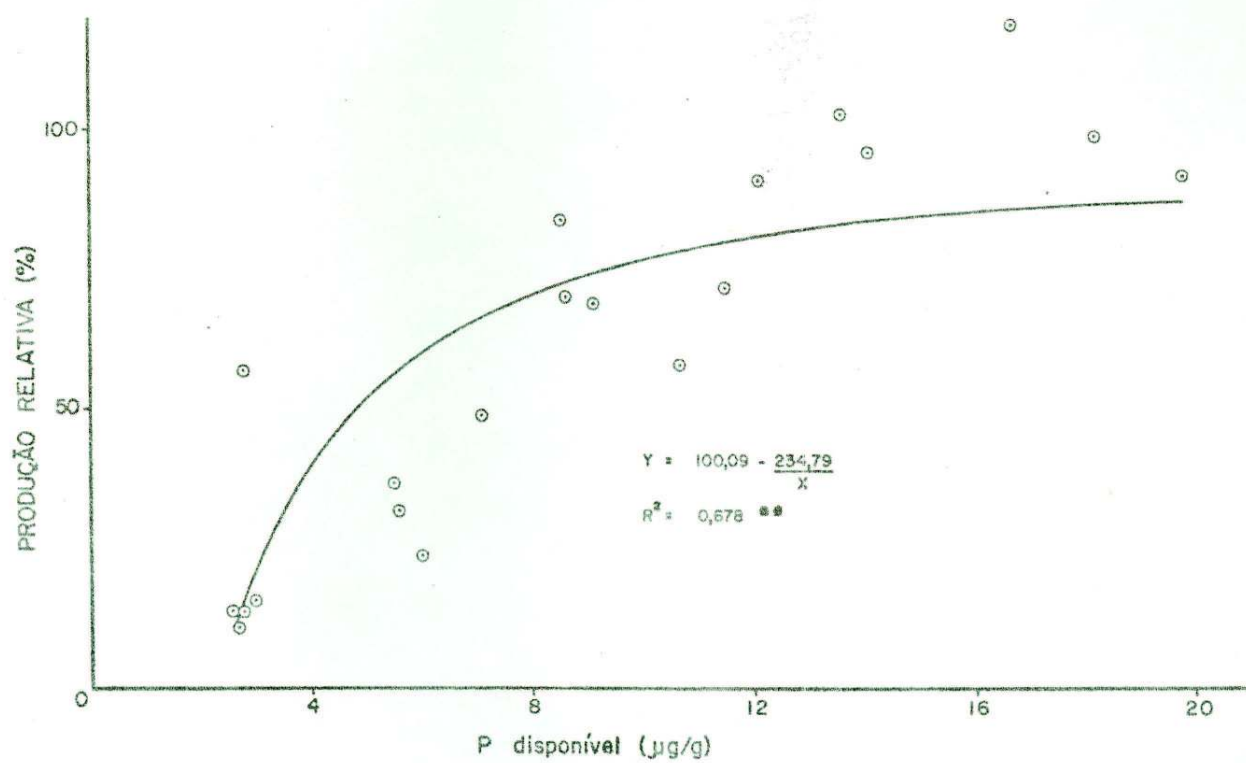


FIGURA 17 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-67).

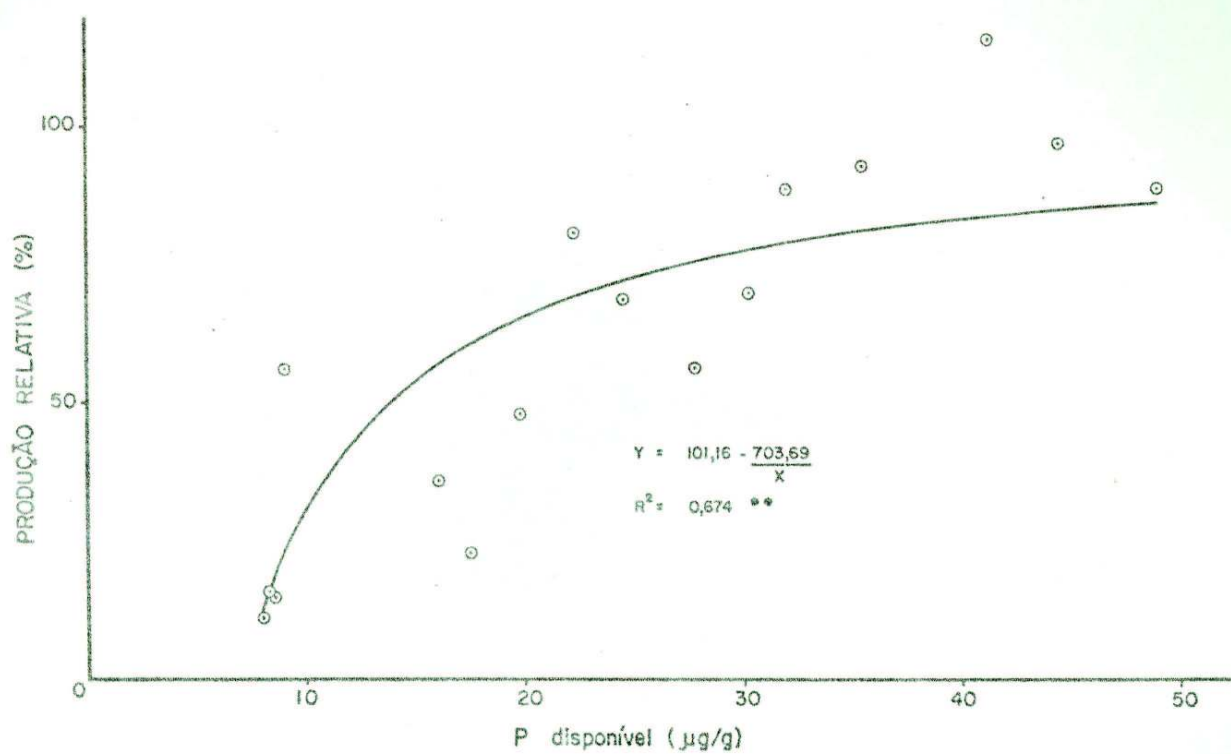


FIGURA 13 - Relação entre produção relativa e teor de P disponível pelo extrator Mehlich 1 (Material de solo TM-67).

Os níveis críticos obtidos, correspondentes aos teores de fósforo disponível que asseguram 80% da produção máxima de matéria seca, foram bastante variáveis entre os materiais de solo (Quadro 28). A maior variação nos níveis críticos foi verificada no extrator Mehlich 1. Desde que o extrator seja sensível à capacidade tampão, principalmente em relação à sua exaustão pela argila presente (pela qualidade e quantidade), espera-se, ao contrário do proposto por HOLFORD (1980b), maior variação de níveis críticos no extrator mais sensível. Nesse caso, embora os dois extratores sejam influenciados pela capacidade tampão, o Mehlich 1 apresentou maior sensibilidade. A associação entre os níveis críticos e as características do solo (Quadro 29) mostra o relacionamento, no caso do extrator mais sensível (Mehlich 1), com a superfície adsorvente, enfatizando o aspecto de exaustão do extrator. A menor variação entre os níveis críticos, pelo extrator Bray 1, associada à ausência de correlações significativas com características ligadas à superfície de adsorção, sugere que esse extrator seja menos sensível à capacidade tampão que o Mehlich 1.

Os níveis críticos obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 no material de solo AP-Cl3 seriam mais adequados para materiais de solo com menor teor de argila, em que os extratores teriam maior poder de remoção do fósforo adsorvido (Quadro 28). É possível que nesse material de solo seu elevado teor de matéria orgânica (5,30%) esteja relacionado com os valores obtidos. Nesse caso, do fósforo adicionado, a maior parte seria retida na superfície de goethita e parte seria associada à matéria orgânica, provavelmente por intermédio de cátions metálicos como ferro e alumínio (WILD, 1950; BRAGA, 1973; FOX, 1979; SAMPLE et alii, 1980). O fósforo retido na matéria orgânica seria dessorvido com mais facilidade, por causa da natureza da ligação estabelecida. Da mesma forma, os extratores químicos, ao atuarem sobre a matéria orgânica, sofreriam menor exaustão, propiciando a obtenção de níveis críticos comparáveis aos de materiais mais arenosos. Por esse mecanismo, o fósforo retido na matéria orgânica constitui pequena fração do fósforo adsorvido, que pode ser exaurida rapidamente. De acordo com esse raciocínio, o valor de fósforo adsorvido calculado pela concentra

QUADRO 28 - Níveis críticos de fósforo, pelos extratores químicos Mehlich 1 e Bray 1, nos materiais de solo estudados

Classe de solo	Identificação	Nível crítico	
		Mehlich 1	Bray 1
		$\mu\text{g/g}$	
AQd	TM-5	42,4	60,7
LEdm	TM-6	39,0	45,7
LEdm	TM-18	40,7	59,6
LEdr	TM-42	29,2	27,1
LEdr	TM-14	15,8	31,5
LVar	TM-56	9,0	26,6
LEdr	AP-C13	23,3	41,0
LVar	TM-67	11,7	33,3
C.V. %		51,00	33,56

ção de fósforo em solução (Quadro 12) está superestimado. Pelos resultados de sensibilidade do extrator à capacidade tampão, a separação de níveis críticos por classe textural é mais necessária no extrator Mehlich 1 que no Bray 1.

Os teores de fósforo disponível obtidos após cada cultivo (Quadros 24 e 25) foram relacionados com a quantidade acumulada de fósforo absorvida (Quadro 23), para cada dose de fósforo aplicada. A maioria das relações obtidas foi linear e, em alguns casos, por estabilização ou flutuação dos teores de fósforo disponível, não foi possível ajustar os dados a essa função (Quadros 30 e 31). Em cada material de solo, as curvas obtidas foram integradas em um só, pelo procedimento matemático descrito no Apêndice 7.3. As curvas assim obtidas ajustaram-se ao modelo linear (Figuras 19 a 26 e Quadro 32). Houve, no entanto, como já referido anteriormente, situações em que os extratores utilizados não foram sensíveis à remoção de

QUADRO 29 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre os níveis críticos de fósforo, pelos extratores químicos Mehlich 1 e Bray 1, e as características dos materiais de solo estudados

	Nível crítico	
	Mehlich 1	Bray 1
Capacidade tampão máxima	-0,482 n.s.	-0,250 n.s.
Adsorção máxima (x_m)	-0,849**	-0,540 n.s.
Energia de adsorção (k)	-0,352 n.s.	-0,074 n.s.
Teor de argila	-0,878**	-0,637 n.s.
Equivalente de unidade	-0,862**	-0,671 n.s.
Água retida a -1/3 bar	-0,850**	-0,655 n.s.
P em solução ($40 \mu\text{g/ml}$) ^a	0,859**	0,488 n.s.
Nível crítico (Mehlich 1)		0,828*

a - Quantidade de fósforo em solução após agitação do material de solo com $40 \mu\text{g P/ml}$ durante 24 horas.

n.s. - Não-significativo.

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

fósforo pelo vegetal. Nas figuras apresentadas, essa situação pode ser visualizada na tendência curvilínea observada nos pontos localizados na porção terminal das curvas ajustadas. Em outros materiais de solo (TM-56, AP-C13 e TM-67) tais pontos não aparecem, uma vez, que, pela falta de ajuste matemático, não foram incluídos no conjunto de dados utilizados. Ajustes lineares foram também obtidos por NOVAIS (1977), que considerou o coeficiente da regressão linear característica do solo e medida da capacidade tampão. Mediante análise da correlação entre o coeficiente linear das equações ajustadas (Quadro 32) e diferentes parâmetros do solo, verificou-se, no entanto, que esse coeficiente não apresentou correlação significativa com a capacidade tampão máxima (Quadro 33). Para o extrator Mehlich 1, contudo, verificou-se relacionamento com um dos componentes da capacidade tam

QUADRO 30 - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em µg/g, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha, com as diferentes doses de adubação fosfatada, em cada material de solo

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicada kg/ha	Coeficientes da regressão (Mehlich 1)		Coeficiente de determinação (R ²)	Coeficientes da regressão (Bray 1)		Coeficiente de determinação (R ²)
			Interseção	Linear		Interseção	Linear	
AQd	TM-3	60	16,33	-0,2733	0,050 n.s.	26,14	-0,1585	0,027 n.s.
		120	36,14	-0,3471	0,007 n.s.	46,72	-0,0737	0,000 n.s.
		240	94,07	-0,0450	0,991**	97,28	-0,2550	0,001 n.s.
		360	151,03	-0,0908	0,008	166,00	-0,7325	0,007 n.s.
LIdm	TM-6	50	21,75	-0,2733	0,000 n.s.	22,70	-0,2232	0,056
		100	37,11	-0,4337	0,000	37,89	-0,3670	0,058 n.s.
		200	90,77	-0,5481	0,004 n.s.	80,31	-0,5014	0,077 n.s.
		300	126,70	-0,6500	0,007 n.s.	118,21	-0,5560	0,008 n.s.
LEdm	TM-18	70	19,61	-0,2937	0,008 n.s.	26,36	-0,3493	0,002 n.s.
		140	43,47	-0,5005	0,002 n.s.	50,44	-0,5258	0,000 n.s.
		280	113,44	-0,8599	0,008 n.s.	108,43	-0,6896	0,000 n.s.
		420	128,76	-0,0711	0,975**	107,07	-0,7273	0,000 n.s.
LEdr	TM-22	60	14,63	-0,2441	0,013*	11,31	-0,1032	0,405 n.s.
		120	30,19	-0,3896	0,003 n.s.	24,31	-0,2702	0,091 n.s.
		240	66,32	-0,5295	0,008 n.s.	52,32	-0,4020	0,000 n.s.
		360	131,40	-0,7606	0,000 n.s.	83,77	-0,5653	1,000 n.s.
LEdr	TM-14	120	8,72	-0,2406	0,007 n.s.	12,02	-0,1378	0,008 n.s.
		240	18,70	-0,2835	0,008 n.s.	28,41	-0,1177	0,003 n.s.
		360	35,10	-0,3550	0,001 n.s.	30,31	-0,3253	0,008 n.s.
		480	45,99	-0,3703	0,000 n.s.	64,71	-0,3754	0,000 n.s.
LVar	TM-56	170	4,04	-0,1396	0,921 n.s.	10,46	-0,2762	0,540 n.s.
		340	9,33	-0,1760	0,989 n.s.	26,25	-0,4390	0,007 n.s.
		510	16,38	-0,1593	0,853 n.s.	41,04	-0,3087	0,008 n.s.
		680	19,71	-0,1124	0,905 n.s.	44,23	-0,1785	0,900 n.s.
LEdr	AP-C13	52	5,62	-0,0223	0,192 n.s.	10,53	-0,1033	0,545 n.s.
		208	13,38	-0,1972	0,005 n.s.	20,02	-0,2320	0,505 n.s.
		390	21,29	-0,1984	0,077 n.s.	34,54	-0,3010	0,001 n.s.
		520	32,39	-0,2754	0,058 n.s.	45,21	-0,2579	0,000 n.s.
LVar	TM-67	160	3,19	-0,0204	0,977 n.s.	9,13	-0,0001	0,007 n.s.
		320	10,76	-0,1344	0,083 n.s.	28,82	-0,3257	0,009 n.s.
		480	17,51	-0,1202	0,932 n.s.	42,72	-0,2491	0,005 n.s.
		640	28,85	-0,1670	0,933 n.s.	64,92	-0,2864	0,000 n.s.

n.s. - Não significativo.

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 31 - Coeficientes das equações de regressão quadrática ajustadas entre o teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha

Classe de solo	Identificação	Dose de P aplicado (kg/ha)	Extrator químico	Coeficientes de regressão			Coeficiente de determinação R^2
				Interseção	Linear	Quadrático	
AQd	TM-5	60	Mehlich 1	25,53	-1,7697	0,0562	0,881*
LEdr	TM-42	60	Mehlich 1	17,61	-0,5281	0,0623	0,935**
LEdr	TM-42	60	Bray 1	17,63	-0,7068	0,0132	0,787*
LEdr	TM-14	120	Bray 1	24,95	-1,7020	0,0430	0,923**

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

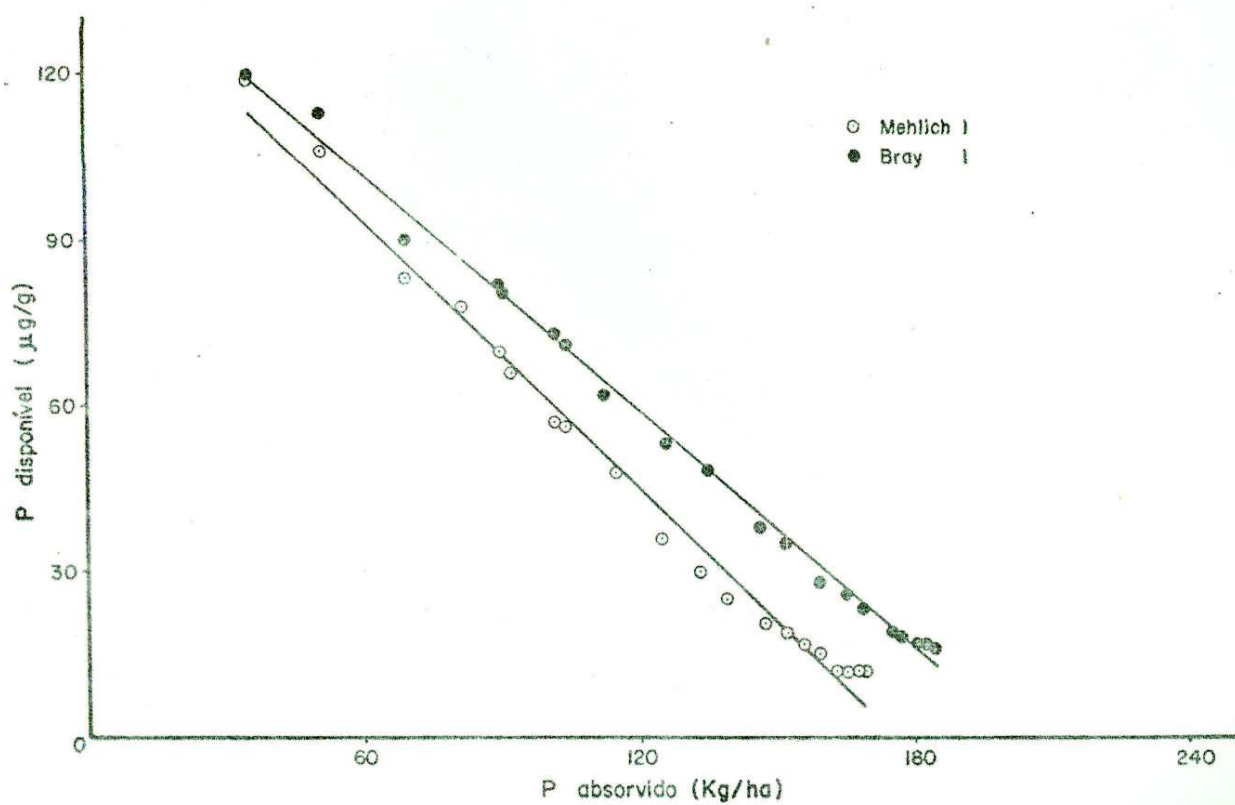


FIGURA 19 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-5).

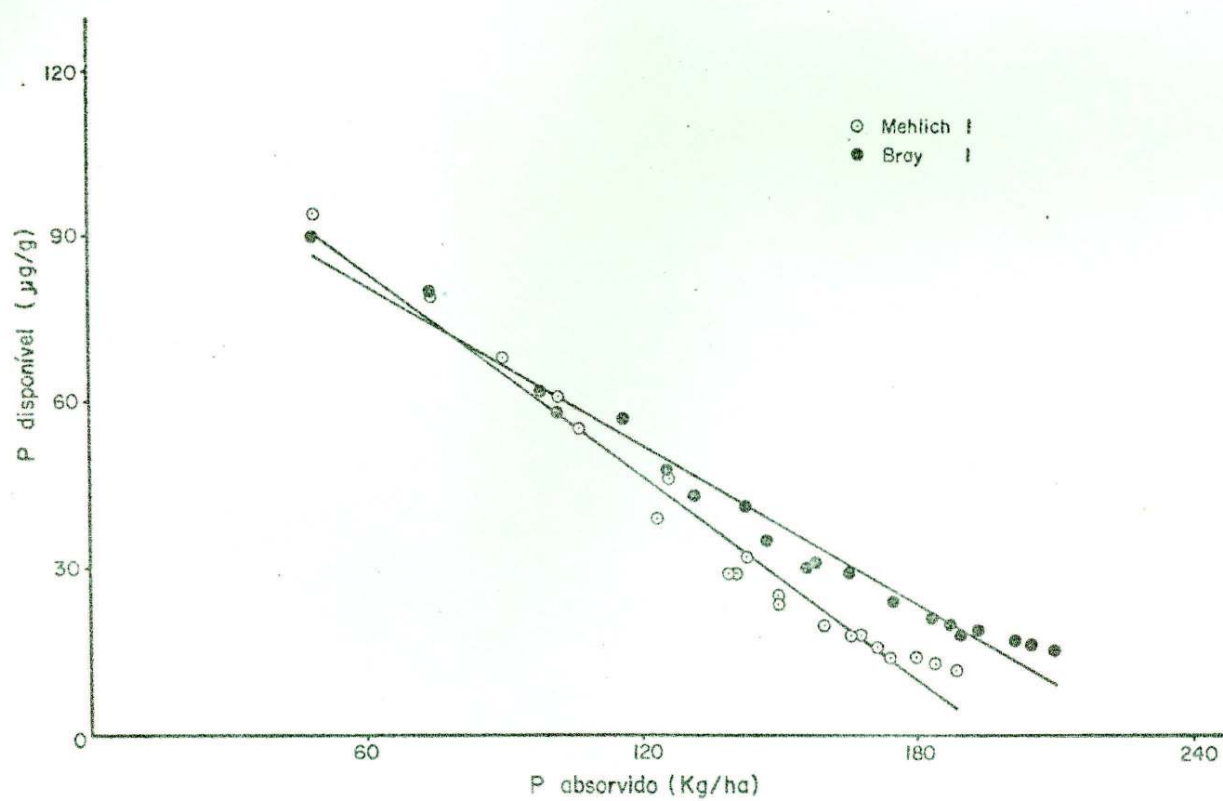


FIGURA 20 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-6).

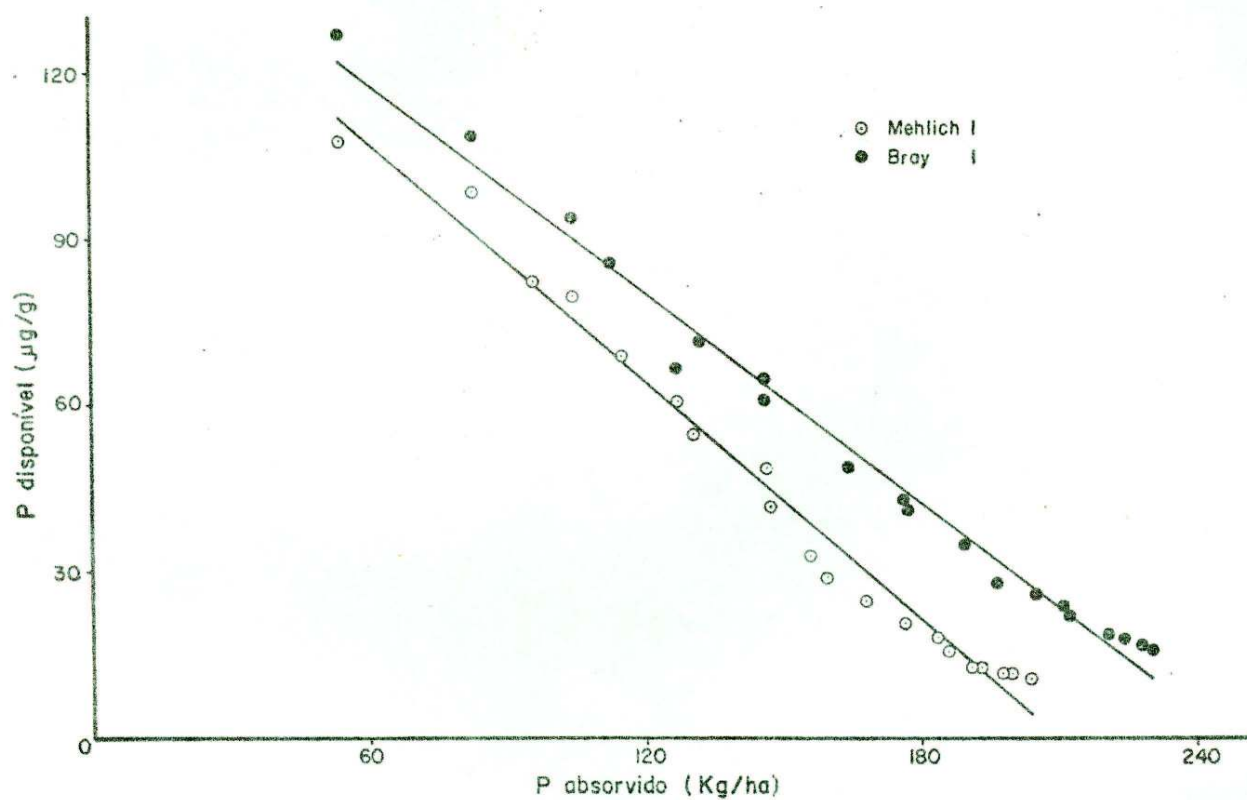


FIGURA 21 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-18).

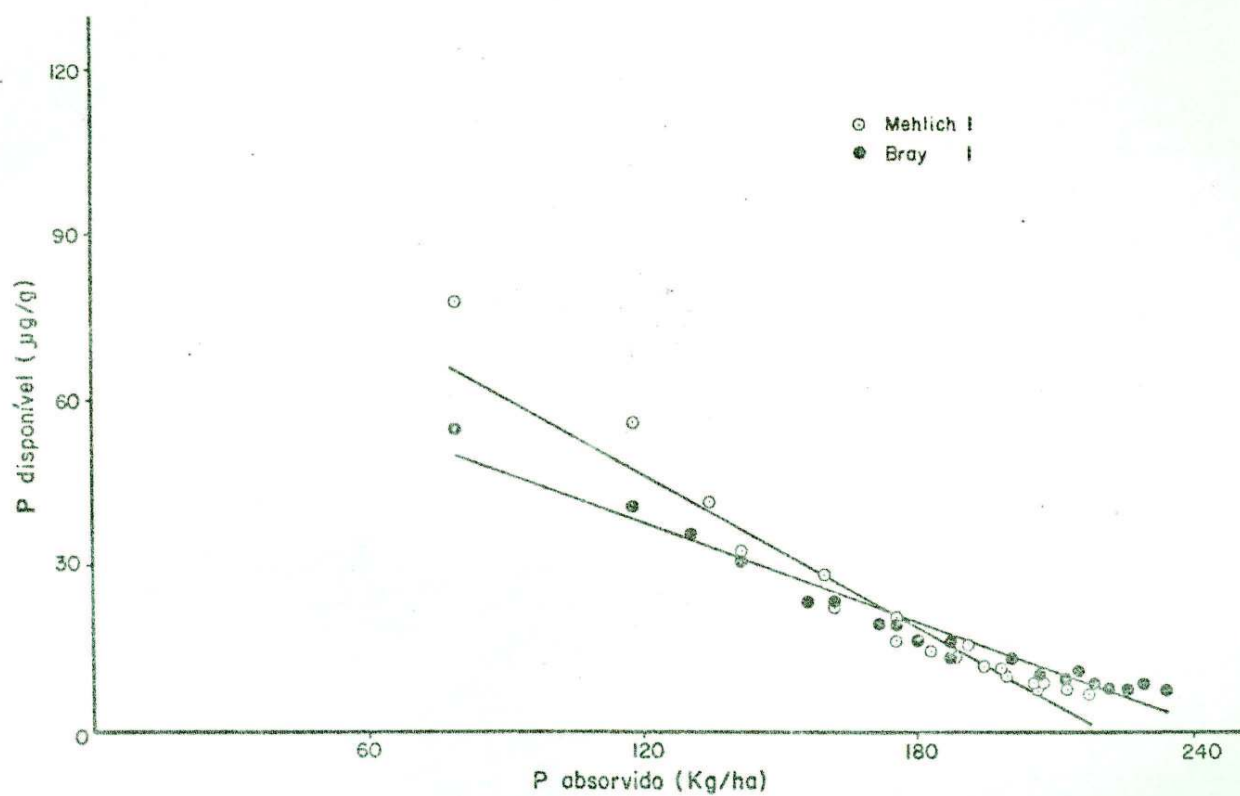


FIGURA 22 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido.
(Material de solo IM-42).

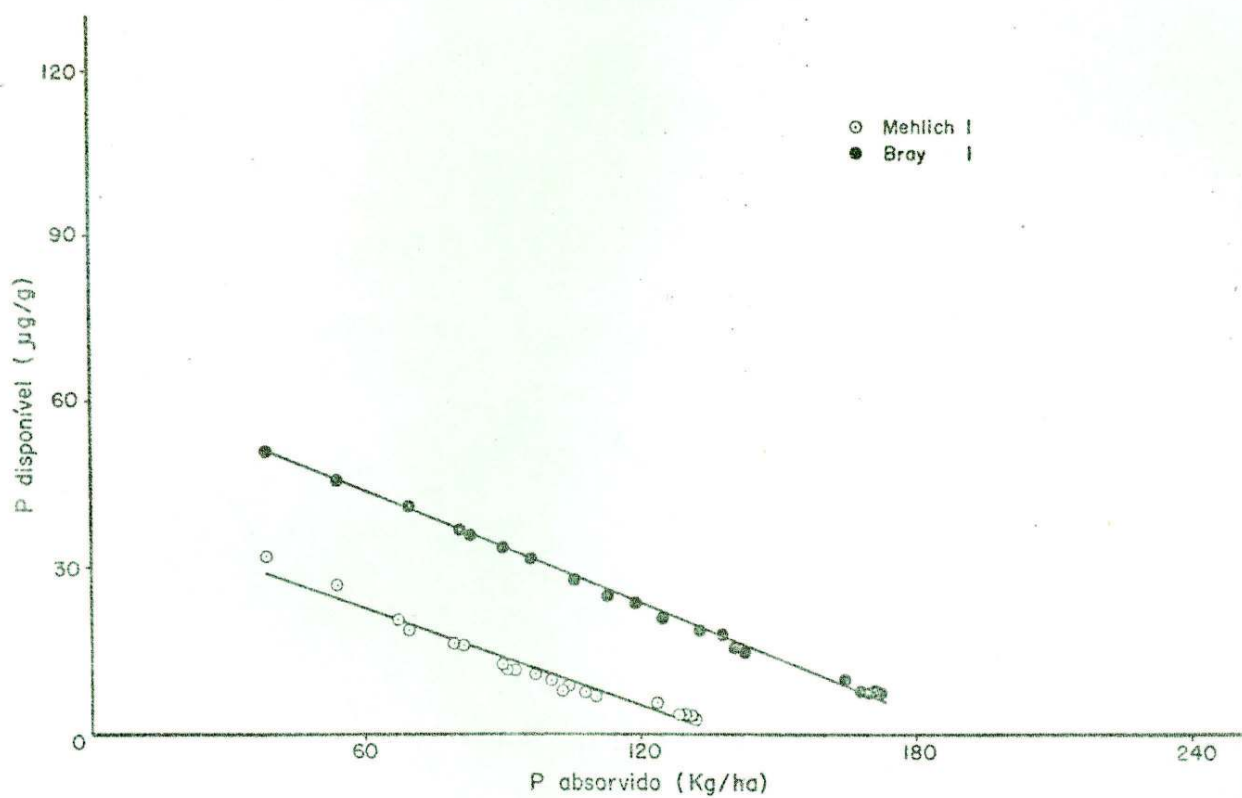


FIGURA 23 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-14).

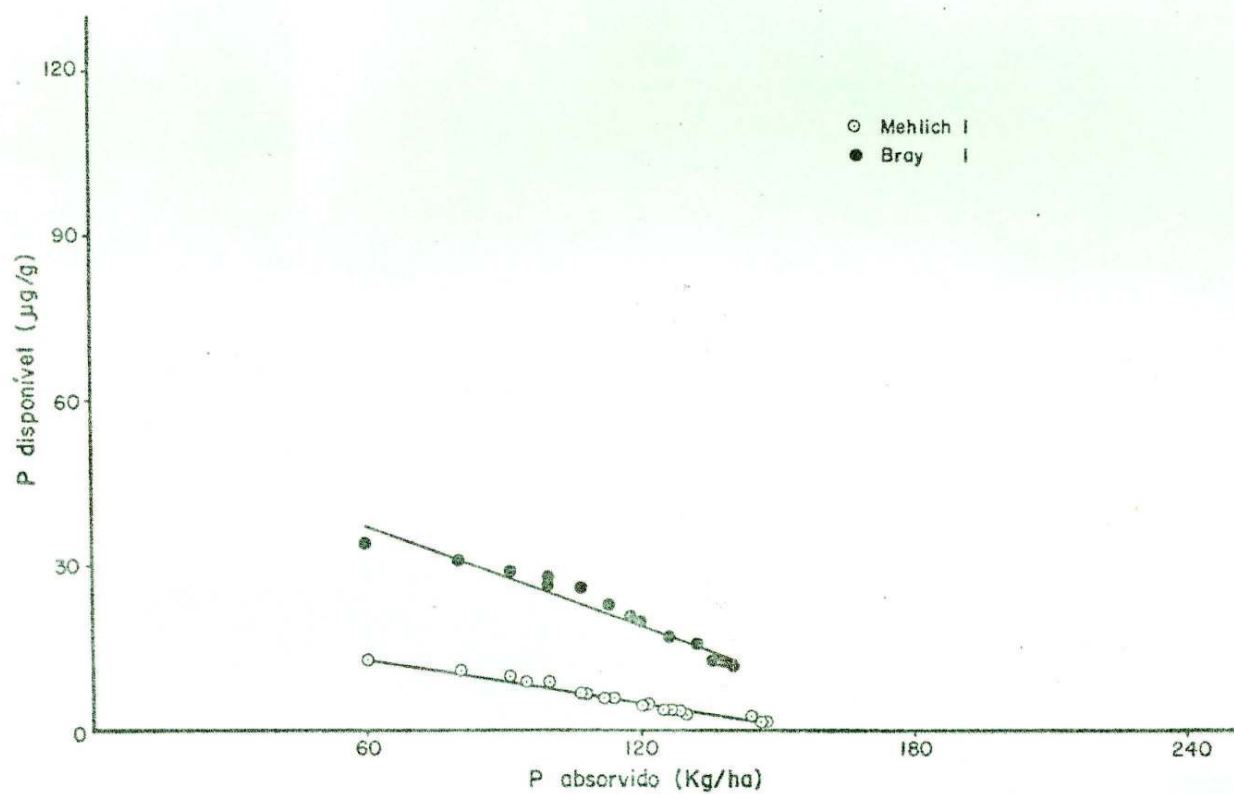


FIGURA 24 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-56).

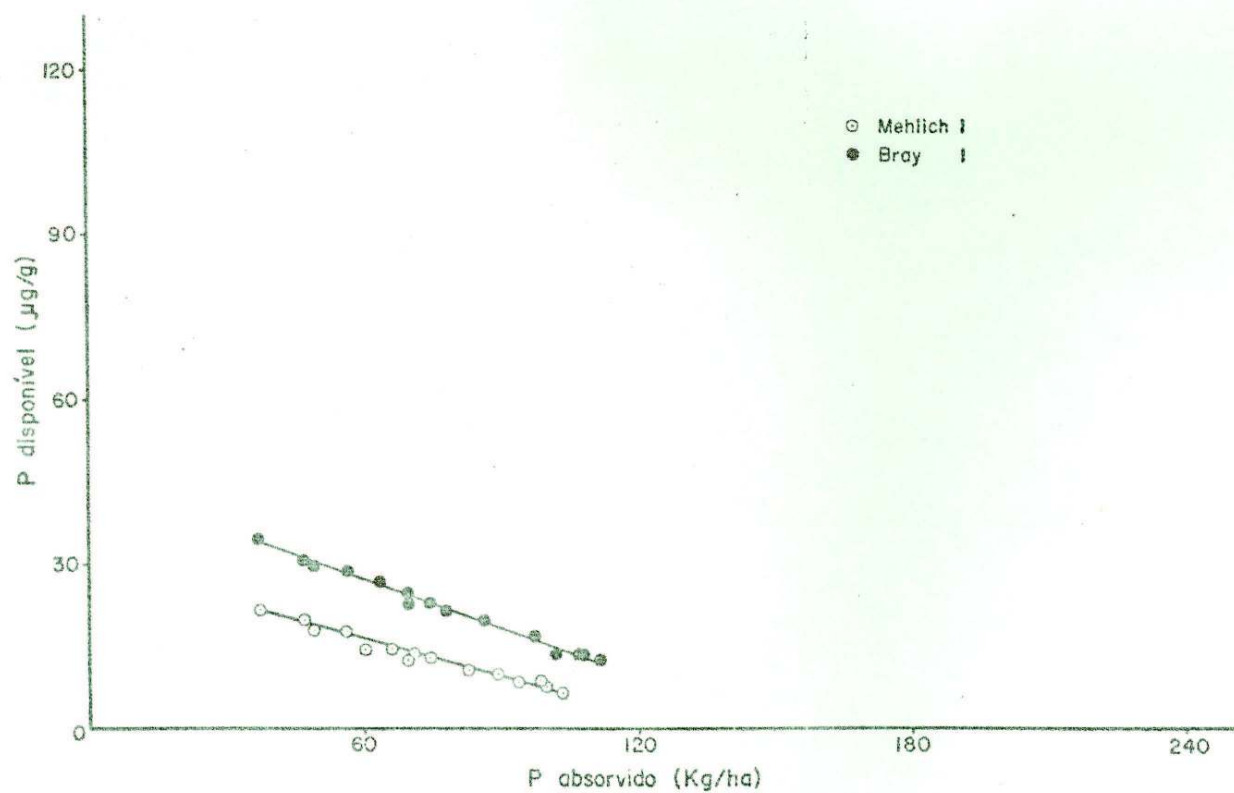


FIGURA 25 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo AP-C13).

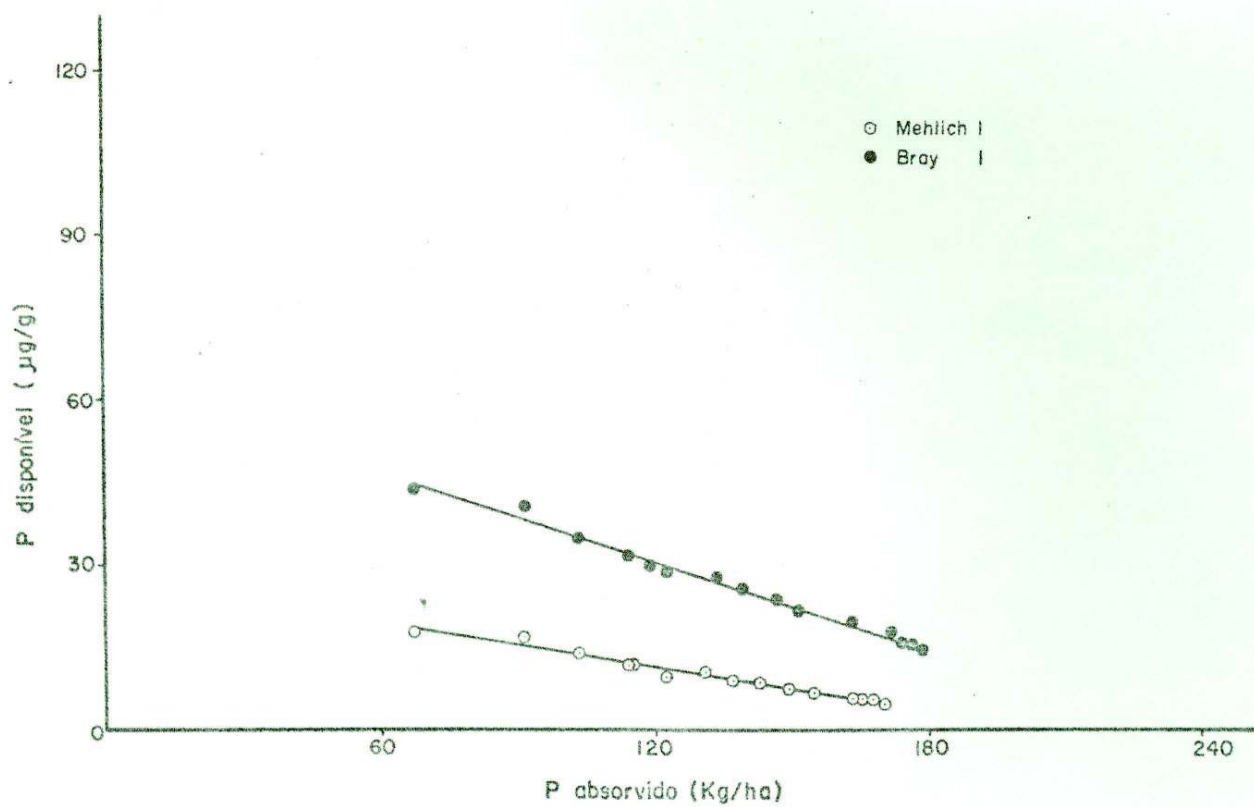


FIGURA 26 - Relações entre teor de P disponível, pelos extratores químicos utilizados, e P absorvido. (Material de solo TM-67).

QUADRO 32 - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo absorvido (X), em kg/ha

Classe de solo	Identificação	Coeficientes da regressão (Mehlich 1)		Coeficiente de determinação (R^2)	Coeficientes da regressão (Bray 1)		Coeficiente de determinação (R^2)
		Interseção	Linear		Interseção	Linear	
AQd	TM-5	141,85	-0,8038	0,988**	144,46	-0,7115	0,994**
LEdm	TM-6	121,09	-0,6167	0,974**	109,65	-0,4783	0,970**
LEdm	TM-18	151,28	-0,7206	0,983**	156,55	-0,6333	0,980**
LEdr	TM-42	103,27	-0,4602	0,879**	73,99	-0,2992	0,960**
LEdr	TM-14	40,27	-0,2916	0,964**	63,76	-0,3312	0,991**
LVar	TM-56	21,17	-0,1317	0,981**	55,34	-0,2997	0,951**
LEdr	AP-C13	29,37	-0,2178	0,982**	44,80	-0,2905	0,992**
LVar	TM-67	27,29	-0,1316	0,982**	63,45	-0,2708	0,990**

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 33 - Coeficientes de correlação linear simples (r) entre o coeficiente de P disponível/P absorvido e diferentes parâmetros do solo

Parâmetros	P disponível/P absorvido	
	Mehlich 1	Bray 1
Capacidade tampão máxima	0,643 n.s.	0,499 n.s.
Adsorção máxima (x_m)	0,904**	0,701 n.s.
Energia de adsorção (k)	0,506 n.s.	0,331 n.s.
Conteúdo de argila	0,947**	0,802*
Equivalente de unidade	0,942**	0,838**
Água retida a -1/3 bar	0,940**	0,836**
P disponível/P absorvido (Bray 1)	0,916**	-
P disponível/P aplicado (Mehlich 1)	-0,932**	-0,746*
P disponível/P aplicado (Bray 1)	-0,961**	-0,857**
P em solução (40 µg/ml) ^a	-0,856**	-0,612 n.s.
Nível crítico (Mehlich 1)	-0,963**	-0,843**
Nível crítico (Bray 1)	-0,820**	-0,929**

^a - Quantidade de fósforo em solução após agitação do material de solo com 40 µg de P/ml durante 24 horas.

n.s. - Não-significativo.

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

pão (adsorção máxima). As correlações obtidas entre o conteúdo de argila e as medidas de retenção de água refletem o mesmo comportamento anteriormente verificado, ligado à superfície de adsorção. O pior relacionamento obtido para o extrator Bray 1 pode estar relacionado com a sua menor sensibilidade à capacidade tampão. É possível que a diferença de sensibilidade esteja associada ao consumo de hidrogênio mais pronunciado no extrator Mehlich 1 que à inativação dos íons fluoreto por complexação ou mesmo adsorção no extrator Bray 1. A existência de correlação significativa com os coeficientes lineares de P disponível/ P aplicado exprime de forma indireta a ação dos extratores na remoção de fósforo adsorvido. Pela sua ação (dissolução e complexação), os extratores utilizados removem fósforo adsorvido, independentemente da natureza da ligação estabelecida, mas de acordo com a superfície adsorvente. Constitui evidência desse fato a ausência de correlações significativas entre os coeficientes de P disponível/ P aplicado e de P disponível/ P absorvido e a energia de adsorção. Daí os baixos valores do coeficiente de correlação com a capacidade tampão máxima (Quadros 16 e 33).

Os coeficientes lineares das equações ajustadas (Quadro 32) mostram ainda que, para os materiais de solo TM-5, TM-6 e TM-18 (extrator Mehlich 1) e TM-5 e TM-18 (extrator Bray 1), a absorção de 1 kg P /ha causou reduções no teor de fósforo disponível superiores a esse valor. Como exemplo, o coeficiente de 0,8038 para o material de solo TM-5 (extrator Mehlich 1) significa que a cada 1 kg P /ha absorvido o teor de fósforo disponível diminui 0,8038 $\mu\text{g/g}$ ou 1,8076 kg/ha. Esse mesmo efeito foi verificado por NOVAIS e KAMPATHI (1979b), tanto no aumento de fósforo disponível com a adubação quanto no seu decréscimo com a absorção de fósforo pelo vegetal. A mineralização do fósforo orgânico no solo, como consequência do fósforo adicionado, e a redução da energia de adsorção, com a aplicação de doses desse elemento, foram as prováveis causas aventadas para explicar o fato ocorrido.

Os dados apresentados no Quadro 30 mostram que, sempre, com as menores doses, nos materiais TM-5, TM-6 e TM-18, foram obtidos os menores coeficientes lineares das regressões. Por outro lado, a aparente incoerên-

cia (maior queda ou aumento no fósforo disponível sem a aplicação ou remoção correspondente) não foi observada no aumento do fósforo disponível com a adubação (Quadro 15). Dessa forma, não parece ser a redução da energia de adsorção o fator determinante do fato observado, tendo em vista as evidências de insensibilidade dos extratores a esse parâmetro. Não foi encontrada, no entanto, explicação alternativa para o comportamento observado.

Com relação ainda às declividades das retas de exaustão do fósforo disponível, pode-se observar que, para o material de solo AP-Cl3, com o extrator de Mehlich 1, o valor encontrado é mais adequado para material com menor adsorção de fósforo, à semelhança do nível crítico encontrado. A hipótese levantada, envolvendo matéria orgânica e adsorção de fosfato, é igualmente aplicável nesse caso.

4.2.5. Recomendação de Adubação

A principal preocupação na recomendação de adubação fosfatada é suprir o vegetal com o nutriente, e a quantidade que deve ser aplicada pode ser estabelecida com base no teor inicial de fósforo disponível e no nível crítico.

Os dados de teores iniciais e níveis críticos de fósforo disponível (Quadros 5 e 28), coeficientes de aumento de fósforo disponível com a adubação e de decréscimo com a absorção desse nutriente (Quadros 15 e 32) compõem os valores do Quadro 34.

A quantidade de fósforo aplicada foi calculada para elevar o teor de fósforo disponível até o valor do nível crítico, descontando-se o teor inicial existente no material de solo. A quantidade absorvida foi calculada para exaurir todo o fósforo disponível. Essa situação, cuja ocorrência é pouco provável, foi estabelecida para o cálculo da equivalência entre o valor de um nível crítico e a quantidade de fósforo que pode ser absorvida. A quantidade de fósforo aplicada relacionou-se positivamente com a capacidade tampão máxima nos dois extratores químicos utilizados ($r = 0,897^{**}$, para Mehlich 1 e $r = 0,763^{*}$, para Bray 1). No extrator Bray 1, a quantidade

QUADRO 34 - Quantidades calculadas de fósforo aplicado, para elevar o teor de fósforo disponível até o nível crítico, e de fósforo absorvido, para reduzir esse teor a zero em cada material de solo

Classe de solo	Identificação	Fósforo disponível				Quantidade de fósforo			
		Inicial		Nível crítico		Aplicada		Absorvida	
		M ₁	B ₁	M ₁	B ₁	M ₁	B ₁	M ₁	B ₁
		μg/g				kg/ha			
AQd	TM-5	3,3	4,6	42,4	60,7	106	153	53	85
LEdm	TM-6	8,8	11,2	39,0	45,7	76	96	63	96
LEdm	TM-18	2,2	7,3	40,7	59,6	137	139	57	94
LEdr	TM-42	8,6	6,6	29,2	27,1	72	84	62	91
LEdr	TM-14	0,9	1,3	15,8	31,5	172	225	54	95
LVar	TM-56	0,7	2,5	9,0	26,6	377	495	58	89
LEdr	AP-C13	5,1	6,4	23,3	41,0	540	741	107	141
LVar	TM-67	0,8	2,0	11,7	33,3	466	604	90	123

M₁ - extrator Mehlich 1.

B₁ - extrator Bray 1.

de aplicada foi superior à calculada para o extrator Mehlich 1, em todos os materiais de solo. Semelhante ordem foi também verificada para o fósforo removido. A quantidade que pode ser absorvida apresentou valores semelhantes em todos os materiais de solo, exceto AP-C13 e TI-67. Esse fato pode estar associado à correlação existente entre o coeficiente de P disponível / P absorvido e os níveis críticos determinados (Quadro 33). Dessa forma, os níveis críticos apresentaram a mesma tendência de variação da queda do teor de fósforo disponível com a absorção do elemento pelo vegetal. É possível que a variação da quantidade de fósforo absorvida verificada nos materiais de solo AP-C13 e TI-67 seja devida a erros experimentais, no emprego das metodologias de determinação dos níveis críticos e das curvas de decréscimo de fósforo disponível conforme o fósforo absorvido.

Tomando os valores médios das quantidades de fósforo absorvidas em todos os materiais de solo, exceto AP-C13 e TI-67, vê-se que o nível crítico corresponde a 60 kg de P/ha e 92 kg de P/ha, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1, respectivamente.

A comparação entre as quantidades de fósforo aplicada e absorvida evidencia a existência do histerese. Esse fato pode ser também expresso pela relação entre os coeficientes de decréscimo do fósforo disponível com a absorção e de acréscimo do fósforo disponível com a adubação (Quadro 35). Desde que a reversibilidade do fósforo adicionado seja completa, a relação esperada é de 1,00. Pelos valores obtidos, houve, no entanto, pronunciada histerese de quantidade adicionada e absorvida. Observação semelhante foi feita anteriormente por NOVAES (1977), que utilizou materiais de solo com mineralogia constituída basicamente de caolinita, "intergrade" vermiculita-clorita e esmectita. Os valores obtidos variaram, no trabalho desse autor, de 1,50 a 2,21 para o extrator Mehlich 1 e de 1,02 a 1,77 para o extrator Bray 1, no período de equilíbrio entre o material de solo e o fertilizante fosfatado de 60 dias.

Os valores da relação, determinados nos materiais de solo utilizados, variaram de 1,50 a 6,46 para o extrator Mehlich 1 e de 1,23 a 6,22 para o extrator Bray 1. A análise de correlação entre as relações obtidas e

os parâmetros relativos à adsorção de fósforo no solo evidenciou a estreita associação existente entre essas variáveis (Quadro 36).

A correlação obtida com a capacidade tampão máxima constitui outra evidência de que esse fator capacidade expressa a tendência de o fósforo adicionado permanecer associado mais à fase sólida que à líquida. Por outro lado, a existência de correlação significativa com a energia de adsorção, além da adsorção máxima, é um indicativo de que a extensão da superfície adsorvente não é o único fator envolvido na histerese. Nesse caso, parece ser também importante a natureza da ligação estabelecida entre a superfície adsorvente e o fósforo adsorvido. Essa suposição é reforçada pela correlação com o teor de goethita no solo. Com base nos trabalhos de ATKINSON et alii (1974), HINGSTON et alii (1974), PARFITT et alii (1975) e PARFITT (1979b), pode-se sugerir que a histerese observada seja, em grande parte, resultado da ligação bidentada estabelecida entre a superfície da goethita e o fosfato adsorvido.

É possível, mediante regressões ajustadas para os quocientes obtidos (Y) e para os teores de goethita no solo (X), estabelecer as relações esperadas entre P aplicado e P absorvido. Para o extrator Mehlich 1, a equação obtida foi $Y = 1,95 + 0,22X$, com $R^2 = 0,953^{**}$; para o extrator Bray 1 $Y = 1,41 + 0,24X$, com $R^2 = 0,971^{**}$. Com base nessas equações, estabeleceram-se as relações esperadas entre P aplicado e P absorvido para diferentes teores de goethita no solo (Quadro 37). Tomando os valores de 60 kg de P/ha e 32 de P/ha como as quantidades de fósforo que podem ser removidas de pois que o teor de fósforo disponível pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, respectivamente tenha sido elevado até o nível crítico, e as relações estimadas entre P aplicado e P absorvido (Quadro 37), podem-se estabelecer as recomendações de adubação dos Quadros 38 e 39.

Considerou-se ainda que a quantidade a aplicar para atingir o nível crítico depende do teor de fósforo disponível existente no solo. Um exemplo de obtenção dos valores das quantidades de fósforo a aplicar encontra-se no Apêndice 7.4. As quantidades estimadas para o extrator Bray 1 foram sempre superiores às determinadas para o extrator Mehlich 1. A razão

QUADRO 35 - Quociente do coeficiente linear da regressão para fósforo disponível e fósforo absorvido e o coeficiente linear da regressão ajustada entre fósforo disponível e fósforo aplicado, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1^a

Classe de solo	Identificação	Quociente	
		Mehlich 1	Bray 1
AQd	TM-5	2,19	1,94
LEdm	TM-6	1,56	1,32
LEdm	TM-10	2,56	1,68
LEdr	TM-42	1,63	1,23
LEdr	TM-14	3,37	2,47
LVar	TM-56	5,99	6,15
LEdr	AP-C13	6,46	6,22
LVar	TM-67	5,62	5,23

^a - Quociente expresso no seu valor absoluto.

QUADRO 36 - Coeficientes de correlação linear (r) entre o quociente de $\frac{P \text{ aplicado}}{P \text{ absorvido}}$ e diferentes parâmetros do solo^a

Parâmetros	Quociente	
	Mehlich 1	Bray 1
Capacidade tampão máxima	0,878**	0,886**
Adsorção máxima (x_m)	0,966**	0,952**
Energia de adsorção (k)	0,841*	0,846*
Conteúdo de argila	0,942**	0,930**
Teor de goethita no solo	0,977**	0,985**

^a - Quociente expresso no seu valor absoluto.

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

dessa diferença, que se acentua à medida que cresce o teor de goethita no solo (Quadros 38 e 39), reside nos valores das quantidades que podem ser renovadas depois de atingido o nível crítico e nas equações que relacionam o teor de goethita com a razão P aplicado/ P absorvido. Considerando as diferentes interseções e coeficientes angulares, os valores estimados da razão citada tendem a aproximar-se nos maiores teores de goethita (Quadro 37). Nesse situação, a diferença entre as quantidades de fósforo absorvidas (60 kg de P/ha e 90 kg de P/ha para os extratores Mehlich 1 e Bray 1) é mais acentuada, pela maior proximidade dos valores da relação P aplicado/ P absorvido.

QUADRO 37 - Relações estimadas de P aplicado/ P absorvido, em diferentes teores de goethita, para os extratores Mehlich 1 e Bray 1

Teor de goethita no solo (%)	P aplicado/ P absorvido	
	Mehlich 1	Bray 1
0,5	2,06	1,53
2,0	2,39	1,89
4,0	2,83	2,37
8,0	3,72	3,33
12,0	4,60	4,29
16,0	5,49	5,25
22,0	6,81	6,69

A utilização das informações constantes dos Quadros 38 e 39 apresenta algumas limitações. Os dados utilizados na confecção dos referidos quadros foram obtidos em condições controladas. Dessa forma, a transposição de uma informação de nível crítico ou de coeficiente de P aplicado/ P absorvido para o campo deve ser vista com reserva. É necessário, portanto, que o modelo teórico proposto seja ajustado no campo, para posterior emprego. Por outro lado, há a possibilidade, demonstrada, neste traba-

QUADRO 38— Quantidade de fósforo de uma fonte solúvel, aplicada a lanço, para atingir o nível crítico pelo extrator Mehlich 1, considerando o teor de goethita no solo e a relação percentual entre o teor de fósforo disponível e o nível crítico

Teor de goethita no solo	Fósforo disponível/nível crítico (%)						
	5	10	20	30	50	70	90
%	kg/ha						
0,5	117	111	99	87	62	37	12
2,0	136	129	115	100	72	43	14
4,0	161	153	136	119	85	51	17
8,0	212	201	179	156	112	67	22
12,0	262	248	221	193	136	83	28
16,0	313	296	254	231	165	99	33
22,0	388	368	327	286	204	123	41

QUADRO 39 - Quantidade de fósforo de uma fonte solúvel, aplicada a lanço, para atingir o nível crítico pelo extrator Bray 1, considerando o teor de goethita no solo e a relação percentual entre o teor de fósforo disponível e o nível crítico

Teor de goethita no solo	Fósforo disponível/nível crítico (%)						
	5	10	20	30	50	70	90
%	kg/ha						
0,5	134	127	113	99	70	42	14
2,0	165	156	139	122	87	52	17
4,0	207	196	174	153	109	65	22
8,0	291	276	245	214	153	92	31
12,0	375	355	316	276	197	110	39
16,0	459	435	386	338	242	145	48
22,0	585	554	492	431	306	185	62

lho, de utilização de um modelo de recomendação de adubação baseado não somente na análise de solo mas no emprego dessa informação, juntamente com o nível crítico e com o teor de goethita. Para Latossolos amarelos ou amarelados, é possível estimar o teor de goethita pela % de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico. No entanto, para solos vermelhos, não é possível, a "priori", estabelecer essa relação, por causa do elevado poder pigmentante da hematita (RESENDE, 1976). Considerando todo o Fe_2O_3 desses solos pertencente à goethita, corre-se o risco de superestimar as doses que devem ser aplicadas para obtenção do nível crítico.

O teor de argila tem sido utilizado em alguns trabalhos como medida indireta do fator capacidade e elemento auxiliar na recomendação de adubação (NOVAIS e KAMPATH, 1976; FREIRE et alii, 1979; NOVAIS e KAMPATH, 1975).

Embora tenha sido obtida correlação significativa entre o conteúdo de argila e o quociente de P aplicado/P absorvido, optou-se por não apresentar a recomendação de adubação baseada em conteúdo de argila, em vez de teor de goethita no solo. Tal opção repousa no fato de que nem sempre deve haver relação linear entre teor de goethita e argila. Estabelecido esse relacionamento, pode ocorrer, como no caso presente, que os teores de argila sejam superestimados. Nessa situação, a quantidade de fósforo que deveria ser aplicada seria reduzida. No atual estágio de recomendação de adubação, reconhece-se, contudo, que já é grande avanço tanto separar os níveis críticos por classe textural como incluir na recomendação de adubação o fator capacidade, representado pelo teor de argila. Dessa forma, a equação $Y = 15,23 + 2,86X$, com $R^2 = 0,889^{**}$, pode ser utilizada, dentro das limitações expostas, para estimar o conteúdo de argila no solo (Y), considerando o teor de goethita (X).

Goethita^{1/}, principalmente, e hematita são os principais compos-

^{1/} Informações prestadas pelo Dr. Mauro Resende, professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

tos de ferro na **fração** argila dos solos brasileiros. Maghemita tem sido encontrada em quantidade relativamente pequena, ao lado de hematita, no Latossolo Roxo e, em quantidades substanciais, nos Latossolos originários de rochas itabiríticas do Quadrilátero Ferrífero (SOARES, 1980). A goethita é a forma ferruginosa exclusiva no Latossolo Amarelo e praticamente exclusiva no Latossolo Vermelho-Amarelo. No entanto, curiosamente, na grande maioria dos casos os horizontes mais profundos (horizontes B₃ e/ou C) são avermelhados, indicando a presença de hematita frequentemente junto com a goethita. Nesse caso, a coloração mais amarela em direção à superfície é um indicativo da transformação biológica (matéria orgânica) da hematita em goethita. Nos Latossolos Vermelho-Escuros (cor dada pela hematita), por outro lado, a goethita está presente em quantidades variáveis, e aumenta em direção à superfície (ALMEIDA, 1979). Quando a hematita é herdada do material de origem (arenitos hematíticos, por exemplo), tende a ser quase exclusiva, refletindo, possivelmente, maior estabilidade, em relação à hematita pedogênica. Os Latossolos originários de rochas máficas, por outro lado, apresentam teores de hematita muito elevados (forma ferruginosa quase excluva) na maior parte do Planalto Central (exceto nos locais de drenagem deficiente, no passado), os quais tendem a diminuir em direção aos regimes pedoclimáticos do sul do país. Mesmo sob regime isopertérmico údico da Amazônia, os teores de hematita decaem substancialmente, com correspondente aumento do teor de goethita.

Geograficamente, portanto, a goethita exclusiva ocorre em pequenas quantidades (Latosolo Amarelo e solos afins) na maior parte da Amazônia, nos tabuleiros costeiros e em solos de depósitos terciários ao longo do Rio São Francisco, e, mesmo nas partes elevadas, ao longo do Espinhaço e da Chapada Diamantina. Os Latossolos de coloração amarelada, de textura média (15 a 35% de argila), podem ser aí incluídos. Maiores teores de goethita, quase exclusiva, são apresentados pelos Latossolos Vermelho-Amarelos, que se distribuem em quase todo o Brasil, das divisas com as Guianas, Colômbia e Venezuela a Santa Catarina e do Acre aos Estados nordestinos. Pertencem a esse conjunto os Latossolos que dominam as partes mais costeiras.

ras do Estado de São Paulo, as partes elevadas do Estado do Rio e do Espírito Santo, grande parte de Minas Gerais, prolongando-se pelos Estados nordestinos, ao longo, principalmente, da chamada Zona da Mata.

No Latossolo Vermelho-Escuro, por outro lado, os teores de goethita são bastante variáveis e deverão ser estudados regionalmente. Esse fato deve-se, principalmente, ao elevado poder pigmentante da hematita (RESENDE, 1976), que invalida a previsão, pela cor, do mineral ferruginoso dominante. Esses solos ocorrem, no Brasil, principalmente ao Sul do paralelo 13, estendendo-se até o Rio Grande do Sul.

No que se refere aos Latossolos originários de rochas máficas (Latossolo Roxo e Latossolo Bruno), os teores de ferro são elevados, sendo os de goethita muito altos no Latossolo Bruno (mais bem expressos nos planaltos balsáticos elevados do sul do País - sul do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e baixos no Latossolo Roxo do Planalto Central (salvo por efeito de má drenagem pretérita). Os teores de goethita tendem a aumentar em direção às partes mais úmidas, tanto para o sul (mais úmido e menos quente) quanto para a Amazônia (mais úmida e mais quente).

O Latossolo originário de rochas itabiríticas, com altíssimo teor de ferro, tende a não apresentar goethita, mas apenas hematita e maghemita.

São poucos os trabalhos em que a disponibilidade de fósforo é relacionada com a natureza da superfície adsorvente. Trabalhando com adsorção de fosfato em goethita pura, PARFITT (1979a) somente verificou adsorção de fósforo pelo vegetal em quantidade significativa quando mais de 40% da superfície adsorvente estavam ocupados por íons fosfato. Por outro lado, micorriza endotrófica da espécie Glomus tennis foi eficiente no aumento da disponibilidade de fósforo para o vegetal utilizado, quando 60 a 70% da superfície da goethita estavam ocupados por íons fosfato. Finalmente, esse autor verificou que ânions orgânicos, especialmente citrato, provocaram deslocamento de fosfato na superfície de goethita.

A prática de utilização de elevadas doses de fertilizante fosfatado já é recomendada há alguns tempo no Brasil, com o nome de adubação de

correção ou fosfatagem (BRAGA, 1975). Visa, basicamente, obter maior saturação no complexo adsorvente e maior reversibilidade do fósforo adicionado, tendo especial importância em solos com elevados teores de goethita. É uma solução que, diante do alto investimento exigido, somente é factível com linhas especiais de crédito. As duas outras possibilidades apontadas por PARFITT (1979a) permanecem no campo da pesquisa, embora o estudo de micorriza tenha recebido considerável impulso nos últimos anos (TINKER, 1980). O fato de citrato deslocar fosfato na superfície de goethita, já anteriormente verificado por NAGARAJAH et alii (1970), coloca em evidência a necessidade de maiores esforços de pesquisa, envolvendo a rizosfera. Desde que incorporadas a sistemas agrícolas, as possibilidades consideradas (micorriza e ânions orgânicos) constituirão importantes práticas de convivência com o problema da baixa reversibilidade do fósforo adsorvido. Assim, o uso de culturas perenes, em vez de anuais, parece ser mais adequado em solos com baixa reposição de fósforo em solução, como é o caso dos solos goethíticos.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Foram coletadas amostras superficiais de oito solos, com textura e mineralogia variáveis, com o objetivo de verificar o comportamento adsorptivo dos componentes mineralógicos da fração argila, bem como relacionar índices de disponibilidade de fósforo com o crescimento vegetal.

Os materiais coletados provieram, predominantemente, de Latossolos, com vegetação de campo tropical e cerrado a floresta, localizados nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

A composição mineralógica da fração argila foi obtida pela técnica de alocação, utilizando os teores dos óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2), associada à difração de raios X. Nos materiais, adubados com diferentes doses de fósforo, efetuaram-se determinações de laboratório e experimentos de exaustão do fosfato adicionado. As determinações de laboratório compreenderam índices de disponibilidade de fósforo representativos dos fatores intensidade (fósforo em solução de CaCl_2 0,01M), quantidade (fósforo adsorvido) e capacidade tampão. A capacidade tampão foi avaliada mediante índices derivados da isoterma de Langmuir, para uma única superfície de adsorção. Utilizou-se ainda o fósforo disponível obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1. Experimentos em casa de vegetação foram realizados com o objetivo de avaliar a remoção do fósforo aplicado por plantas de milho (*Penisetum thyphoides* cv. CMS XM 1) e o decréscimo do fósforo disponível, determinado pelos extratores utilizados. Cada experimento consistiu em 32 tratamentos (8 materiais de solo e 4 doses de fósforo por material), dispostos no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Após

cada período experimental o material vegetal foi cortado, determinando-se, depois de sua secagem, o peso da matéria seca e a quantidade de fósforo absorvido. Depois de cada cultivo foram retiradas amostras dos materiais de solo, determinando-se os teores de fósforo disponível pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1.

Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que:

1. A goethita foi o principal componente da fração argila responsável pelas variações observadas na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima de fósforo.

2. Todos os índices de capacidade tampão de fósforo diminuíram com o aumento das doses de fósforo aplicadas. A redução na energia de adsorção foi a principal causa desse decréscimo.

3. As alterações causadas pela adubação fosfatada nos teores de fósforo disponível relacionaram-se negativamente com a capacidade tampão máxima.

4. Os extratores Mehlich 1 e Bray 1 foram sensíveis à capacidade tampão. Dentre os dois extratores químicos, o Mehlich apresentou maior sensibilidade, o que foi salientado pela relação negativa entre os níveis críticos determinados e o conteúdo de argila.

5. Verificaram-se evidências de que o extrator Bray 1 removeu maior proporção de fósforo não-lábil, em relação ao fósforo lábil, que o extrator Mehlich 1.

6. Os extratores químicos utilizados não foram sensíveis às alterações na energia de adsorção.

7. As relações entre fósforo disponível e fósforo absorvido foram predominantemente lineares. O decréscimo nos teores de fósforo disponível de acordo com a absorção de fósforo relacionou-se negativamente com a extensão da superfície adsorvente.

8. Para o mesmo valor de fósforo absorvido (fator quantidade), a absorção de fósforo pelo vegetal decresceu de acordo com a capacidade tampão. Para o mesmo valor de fósforo absorvido, faz-se necessária a aplicação

de maior dose de fósforo em solos com maior capacidade tampão.

9. Dentre os componentes da capacidade tampão máxima, a energia de adsorção teve maior poder preditivo da absorção de fósforo que a adsorção máxima.

10. Os índices utilizados de capacidade tampão foram semelhantes na predição do fósforo absorvido.

11. Verificou-se pronunciada histerese entre as quantidades de fósforo adicionado e de fósforo absorvido. A relação entre essas duas quantidades correlacionou-se positivamente com a capacidade tampão máxima, com a energia e capacidade máxima de adsorção e com o teor de goethita.

12. As quantidades de fósforo que podem ser absorvidas pelo vegetal, depois que o teor de fósforo disponível é elevado ao nível crítico, apresentaram pequena variação na maioria dos materiais de solo estudados.

13. As quantidades de fósforo recomendadas para aplicação a lãço variaram de acordo com o teor de goethita no solo.

6. LITERATURA CITADA

- ADAMS, F. Ionic concentrations and activities in soil solutions. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35:420-6, 1975.
- ALMEIDA, J.R. Cronocromosseguência de solos originários de rochas pelíticas do grupo Bambuí. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 150 p. (Tese M.S.).
- ASLYNG, H.C. The lime and phosphate potentials of soils; the solubility and availability of phosphates. Yearb. Royal Vet. Agric. Coll., 1:1-50, 1954.
- ASLYNG, H.C. Phosphate potential and phosphate status of soils. Acta Agriculturae Scandinavica, 14:261-85, 1964.
- ATKINSON, B.J.; PARFITT, R.L. & SMART, R. St.C. Infra-red study of phosphate adsorption on goethite. J. Chem. Soc. Faraday Trans. I, 70: 1472-9, 1974.
- BACHE, B.W. Aluminum and iron phosphates studies relating to soils. II. Reactions between phosphate and hydrous oxides. J. Soil Sci., 15:110-6, 1964.
- BACHE, B.W. & ROGERS, H.E. Soil phosphate values in relation to phosphate supply to plants from some Nigerian soils. J. Agric. Sci., 74:383-90, 1970.
- BACHE, B.W. & WILLIAMS, E.G. A phosphate sorption index for soils. J. Soil Sci., 22:289-301, 1971.

- BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. I. Intensidade e capacidade tampão de fósforo. Experientiae, 19:17-32, 1975a.
- BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. II. Quantidade de fósforo e fósforo "disponível". Rev. Ceres, 22:50-61, 1975b.
- BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em latossolos do Estado de Minas Gerais. III. Índices de disponibilidade de fósforo e crescimento vegetal. Experientiae, 20:217-34, 1975c.
- BALDOVINOS, F. & THOMAS, G.H. The effect of soil clay content on phosphorus uptake. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31:680-2, 1967.
- BARD, Y. Nonlinear parameter estimation. New York, Academic Press, 1974. 341 p.
- BARROW, N.J. Relationship between uptake of phosphorus by plants and the phosphorus potential and buffering capacity of the soil - An attempt to test Schofield's hypothesis. Soil Sci., 104:99-106, 1967.
- BARROW, N.J. Comparison of the adsorption of molybdate, sulphate and phosphite by soils. Soil Sci., 109:282-8, 1970.
- BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E., SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 333-59.
- BARROW, N.J.; BOWDEN, J.W.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface. Aust. J. Soil Res., 18:395-404, 1980.
- BARROW, N.J.; OZANNE, P.G. & SHAW, T.C. Nutrient potential and capacity. I. The concepts of nutrient potential and capacity and their application to soil potassium and phosphorus. Aust. J. Agr. Res., 16:77-91, 1965.
- BECKETT, P.H.T. & WHITE, E.E. Studies on the phosphorus potentials of soils. Part. III: The pool of labile inorganic phosphate. Plant and Soil, 21:253-82, 1964.

BECKWITH, R.S. Sorbed phosphate at standart supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb., 5:52-8, 1965.

BIGHAM, J.M. Iron mineralogy of red-wellow hued ultisols and oxisols as determined by Mossbauer sprectroscopy, X-ray diffractometry and supplemental laboratory techniques. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 165 p. (M.S. Thesis).

BOWDEN, J.W.; NAGARAJAH, S.; BARROW, N.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. Aust. J. Soil Res., 18:49-60, 1980.

BOWDEN, J.W.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Ionic adsorption on variable charge mineral surfaces. Theoretical charge development and tritiation curves. Aust. J. Soil Res., 15:121-36, 1977.

BRAGA, J.M. Fixação de fósforo. In: SEMINÁRIO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, Piracicaba, 1973. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1973. p. 1-20.

BRAGA, J.M. Fósforo e fosfatagem. Sete Lagoas, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, 1975. 24 p.

BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. Rev. Ceres, 21:73-85, 1974.

BRAY, R.H. Correlation of soil tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirements. In: KITCHEN, H.B. Diagnostic techniques for soils and crops. Washington, The American Potash Institute, 1947. p. 53-85.

BREEUWSMA, A. Adsorption of ions on hematite (Fe_2O_3). A colloid chemical study. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen, 73:1-122, 1973.

CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci., 84:133-44, 1957.

COSTA NETO, P.L.O. Estatística. São Paulo, Edgar Blücher, 1977. 264 p.

DEAN, L.A. Fixation of soil phosphorus. Adv. Agron., 1:391-411, 1949.

DELAZARI, P.C. Disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Espírito Santo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 42 p. (Tese de M.S.).

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. (s.n.p.).

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Estudo expedito de solos da região do Alto Paranaíba para fins de classificação, correlação e legenda preliminar. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1980. 84 p. (Bol. Tec. 64).

FASSBENDER, H.W. Descripción físico-química del sistema fertilizante fosfatado-suelo-planta. Turrialba, 16:237-46, 1966.

FERNANDES, B.; RESENDE, M. & REZENDE, S.B. Caracterização de alguns solos sob cerrado e disponibilidade d'água para culturas. Experientiae, 24:211-60, 1978.

FIFE, C.V. An evaluation of ammonium fluoride as a selective extractant for aluminum-bound soil phosphate. IV. Detailed studies on selected soils. Soil Sci., 96:112-20, 1963.

FOX, R.L. Comparative responses of field grown crops to phosphate concentrations in soil solutions. In: MUSSELL, H. & STAPLES, R. Stress physiology in crop plants. New York, John Wiley & Sons, 1979. p. 82-106.

FOX, R.L. & KAMPATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34:902-7, 1970.

FOX, R.L. & SEARLE, P.G.E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. Diversity of soils in the tropics. Madison, American Society of Agronomy, 1978. p. 97-119.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.E.; SANTOS, H.L. & SANTOS, P.R.R.S. Adubação fosfatada para a cultura da soja (Glycine max (L.) Merrill) baseada no fósforo disponível e no fator "capacidade". R. bras. Ci. Solo., 3:105-11, 1979.

- GUNARY, D. & SUTTON, G.D. Soils factors affecting plant uptake of phosphate. J. Soil. Sci., 18:167-73, 1967.
- HINGSTON, F.J.; ATKINSON, R.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Specific adsorption of anions. Nature, 215:1459-61, 1967.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxides surfaces. J. Soil Sci., 25:16-26, 1974.
- HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. Plant and Soil, 45:433-44, 1976.
- HOLFORD, I.C.R. Evaluation of soil phosphate buffering index. Aust. J. Soil Res., 17:495-504, 1979.
- HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil test in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:555-9, 1980a.
- HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationships between soil tests and labile phosphate in wheat-growing soils. Aust. J. Soil Res., 18:405-14, 1980b.
- HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. Plant and Soil, 44:219-29, 1976a.
- HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. Plant and Soil, 44:377-89, 1976b.
- HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and by soil tests. Aust. J. Soil Res., 17:511-14, 1979.
- HOLFORD, I.C.R.; WEDDERBURN, R.W.M. & MATTINGLY, G.E.G. A Langmuir two-surface equation as a model for phosphate adsorption by soils. J. Soil Sci., 25:242-55, 1974.

HSU, P.H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society American, 1977. p. 99-142.

JACKSON, M.L. Soil chemical analysis - Advanced course. Madison, publica do pelo autor, 1973. 895 p.

JENSEN, H.E. Phosphate potential and phosphate capacity of soils. Plant and Soil, 33:17-29, 1970.

JONES, R.C. X-ray diffraction line profile analysis vs. phosphorus sorption by 11 Puerto Rican soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:818-25, 1981.

JONES, R.C.; HUDNALL, W.H. & SAKAY, W.S. Some highly weathered soils of Puerto Rico. 2. Mineralogy. Geoderma, 27:75-137, 1982.

JUD, A.S.R. & FOX, R.L. Phosphate sorption characteristics of some Benchmark soils of West Africa. Soil Sci., 124:370-6, 1977.

JURINAK, J.J. Surface chemistry of hematite: anion penetration effect on water adsorption. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30:559-62, 1966.

KAFKAFI, U.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Desorption of phosphate from kaolinite. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31:348-53, 1967.

KAMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in soils of Southern Brazil. In: MEETING EUROPEAN CLAY GROUPS, 4th. Freising, 1980. Abstracts ... Freising, 1980. p. 78-9.

KAMPATH, E.J. & WATSON, H.E. Conventional soils and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 433-69.

KHASAWNEH, F.E. Solution ion activity and plant growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35:426-35, 1971.

KYLE, J.H.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Kinetics of isotopic exchange of phosphate adsorbed on gibbsite. J. Soil Sci., 26:32-43, 1975.

- LARSEN, S. Soil phosphorus. Adv. Agron., 19:151-211, 1967.
- LEAL, J.R. & VELOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em latossolos sob vegetação de cerrado. Pesq. Agropec. Bras., 8:81-8, 1973.
- LOTT, W.L.; NERY, J.P.; GALLO, J.R. & MEDCALF, J.C. A técnica da análise foliar aplicada ao cafeeiro. São Paulo, IBEC Research Institute, 1956. 40 p. (Bol. Tec., 9).
- MATTINGLY, G.E.G. The reliability of soil phosphorus analysis in relation to fertilizer recommendations. Chem. Ind., 6:690-3, 1980.
- McLAUGHLIN, J.R.; RYDEN, J.C. & SYERS, J.K. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminium-containing components. J. Soil Sci., 32:365-77, 1981.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute, 1979. 593 p.
- MIRANDA, L.N. & VOLKMELOS, S.J. Relações entre a resposta da soja a adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. R. bras. Ci. Solo, 5:58-63, 1981.
- MULJADI, D.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite gibbsite and pseudobohemite. 1. The isotherms and the effect of pH on adsorption. J. Soil Sci., 17:212-29, 1966a.
- MULJADI, D.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite gibbsite and pseudobohemite. 2. The location of adsorption sites. J. Soil Sci., 17:230-7, 1966b.
- MULJADI, D.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite gibbsite and pseudobohemite. 3. The effect of temperature on adsorption. J. Soil Sci., 17:238-47, 1966c.
- NAGARAJAH, S.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. Competitive adsorption of phosphate with poly-galacturonate and organic anions on kaolinite and oxides surfaces. Nature, 228:83-5, 1970.

- NALOVIC, L.; PEDRO, G. & JANOT, C. Demonstration by Mössbauer spectroscopy of the role played by transitional trace elements in the crystallogenesis of iron hydroxides. (III). In: INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE, Wilmette, 1975. Proceedings ... Wilmette, Applied Publishing, 1975. p. 601-10.
- NELSON, W.L.; MEHLICH, A. & WINTERS, E. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. In: FIERRE, W.H. & NORMAN, A.G. Soil and fertilizer phosphorus. New York, Academic Press, 1953. p. 153-88.
- NORRISH, K. & TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. J. Soil Sci., 12:294-306, 1961.
- NOVAIS, R.F. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 153 p. (Ph.D. Thesis).
- NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:934-5, 1978.
- NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. R. bras. Ci. Solo, 3:37-41, 1979a.
- NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do "fator capacidade". R. bras. Ci. Solo, 3:41-6, 1979b.
- NYE, P.H. The effect of the nutrient intensity and buffering power of a soil, and the absorbing power, size and root hairs of a root, on nutrient absorption by diffusion. Plant and Soil, 25:81-105, 1966.
- OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 361-410.

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. Am. Proc., 21:144-9, 1957.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 27:648-53, 1963.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. Soil Sci., 110:318-27, 1970.

OZANE, P.G. & SHAW, T.C. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. Aust. J. Agr. Res., 18:601-12, 1967.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. Adv. Agron., 30:1-50, 1978.

PARFITT, R.L. The availability of P from phosphate-goethite bridging complexes. Desorption and uptake by ryegrass. Plant and Soil, 53:55-65, 1979a.

PARFITT, R.L. The nature of the phosphate-goethite (α -FeOOH) complex formed with $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ at different surface coverage. Soil Sci. Soc. Am. J., 43:623-5, 1979b.

PARFITT, R.L.; ATKINSON, R.J. & SMART, R.S.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39:837-41, 1975.

PARFITT, R.L.; FRASER, A.R.; RUSSEL, J.D. & FARMER, V.C. Adsorption of hydrous oxides II. Oxalate benzoate and phosphate on gibbsite. J. Soil Sci., 28:40-7, 1977.

PEASLEE, D.E. & FOX, R.L. Phosphorus fertilizer requirements as estimated by phosphate sorption. Comm. Soil Sci. Plant Ana., 9:975-93, 1978.

POSNER, A.M. & BONDEN, J.W. Adsorption isotherms: should they be split? J. Soil Sci., 31:1-10, 1980.

PRATT, P.F. & GARBER, H.J. Correlations of phosphorus availability by chemical tests with inorganic phosphorus fractions. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 28:23-6, 1964.

- RAJAN, S.S.S. Phosphorus adsorption characteristics of Hawaiian soils and their relationships to equilibrium phosphorus concentrations required for maximum growth of millet. Plant and Soil, 39:519-32, 1973.
- RAJAN, S.S.S. & FOX, R.L. Phosphate adsorption by soils: II. Reactions in tropical acid soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39:846-51, 1975.
- RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1976. 237 p. (Ph.D. Thesis).
- REZENDE, S.B. Geomorphology, mineralogy and genesis of four soils on gneiss in Southeastern Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1980. 143 p. (Ph.D. Thesis).
- RYDEN, J.C.; McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. J. Soil Sci., 28:72-92, 1977a.
- RYDEN, J.C.; McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. Time dependent sorption of phosphate by soils and hydrous ferric oxides. J. Soil Sci., 28:585-95, 1977b.
- RYDEN, J.C. & PRATT, P.F. Phosphorus removal from waste water applied to land. Hilgardia, 48:1-36, 1980.
- RYDEN, J.C. & SYERS, J.K. Desorption and isotopic exchange relationships of phosphate sorbed by soils and hydrous ferric oxide gel. J. Soil Sci., 28:596-609, 1977.
- SALMON, R.C. Effects of initial phosphate intensity and sorption or buffering capacity of soil on fertilizer requirements of different crops grown in pots or in the field. J. Agric. Sci., 81:39-46, 1973.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J. & RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPFATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 263-310.

- SANCHEZ, P.A. & UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 471-54.
- SANTANA, D.P. Estudo de solos do Triângulo Mineiro e de Viçosa: I. Mineralogia; II. Adsorção de fosfatos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1973. 56 p. (Tese M.S.).
- SANTOS, P.S. Tecnologia de argilas. Fundamentos. São Paulo, Edgar Blücher, 1975. 340 p.
- SCHOFIELD, R.K. Can a precise meaning be given to "available" soil phosphorus. Soil and Fertilizers, 18:373-5, 1955.
- SCHWERTMANN, U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide. Nature, 212:645-6, 1966.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. Minerals in soil environments. Madison, Soil Science Society of America, 1977. p. 145-80.
- SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. The significance of oxides for the surface properties of soils and the usefulness of synthetic oxides as models for their study. In: The nature and properties of soil colloid surfaces, Wageningen, International Society of Soil Science, 1981. p. 59-88. (Bull., 60).
- SMITH, A.N. Distinction between iron and aluminum phosphate in Chang and Jackson's procedure for fractionation inorganic soil phosphorus. Agrochimica, 9:162-8, 1965.
- SOARES, M.F. Caracterização química e mineralógica de concreções ferruginosas de alguns solos brasileiros. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1980. 72 p. (Tese M.S.).
- SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H. & MONIZ, A.C. Caracterização sedimentológica e mineralógica de formações superficiais argilo-arenosas peculiares dos planaltos do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, M.G. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29^o, Ouro Preto, 1976. Anais ... Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia, 1976. v.2, p. 241-7.

- SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SMILLIE, G.W. & COREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37:358-63, 1973.
- SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.D.H. & MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil, Soil Sci., 112:267-75, 1971.
- TINKER, P.B. Role of rhizosphere microorganisms in phosphorus uptake by plants. In: KHASANIEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 617-54.
- THOMAS, G.W. PEASLEE, D.E. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M. & BEATON, J.D. Soil testing and plant analysis. Madison, Soil Science Society of America, 1973. p. 115-29.
- VAN RAIJ, B. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. bras. Ci. Solo, 2:1-9, 1978.
- VASCONCELOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & PINTO, O.C. Fósforo em dois latossolos do Estado de Mato Grosso. Experientiae, 18:267-85, 1974.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EPE, 1969. 24 p. (Bol. Téc., 7).
- VIEIRA, L.S. & BORNEMISZA, E. Categorías de fósforo en los principales grandes grupos de suelos en la Amazonia de Brasil. Turrialba, 18:242-8, 1968.
- WEBBER, M.D. & MATTINGLY, G.E.G. Inorganic soil phosphorus. I. Changes in monocalcium phosphate potentials on cropping. J. Soil Sci., 21:111-20, 1970.
- WIKLANDER, L. Kinetics of phosphate exchange in soils. Ann. Roy. Agric. Coll. Sweden, 17:407-24, 1950.
- WILD, A. The retention of phosphate by soil. J. Soil Sci., 1:221-38, 1950.

7. APENDICE

7.1. Dedução das fórmulas empregadas na alocação de hematita e goethita

Admite-se que haja apenas três formas ferruginosas no solo, hematita (Hm), goethita (Go) e ilmenita (Il), e que a ilmenita somente se encontre na fração areia ou silte e o anatásio (An) na fração argila.

Assim:

$$Fe_S = Fe_{Il} \cdot Il + Fe_{Hm} \cdot H_m + Fe_{Go} \cdot Go \quad (1)$$

em que

Fe_S = teor de Fe_2O_3 no solo obtido pelo ataque sulfúrico

Fe_{Il} = teor de Fe_2O_3 na ilmenita

Il = teor de ilmenita no solo

Fe_{Hm} = teor de Fe_2O_3 na hematita

H_m = teor de hematita no solo

Fe_{Go} = teor de Fe_2O_3 na goethita

Go = teor de goethita no solo

$$\text{Mas: } Ti_S - (Ti_{An} \cdot \frac{r}{100}) = Fe_{Il} \cdot Il \quad (2)$$

em que

Ti_S = teor de TiO_2 no solo obtido pelo ataque sulfúrico

Ti_{An} = teor de TiO_2 na fração argila e pertencente ao anatásio, obtido pelo ataque sulfúrico

r = % de argila

Combinando 1 e 2, tem-se

$$Fe_S - Ti_S + (Ti_{An} \cdot \frac{r}{100}) - Fe_{Hm} \cdot H_m - Fe_{Go} \cdot Go = 0$$

Chamando de R o termo

$$Fe_S - Ti_S + (Ti_{An} \cdot \frac{r}{100}), \text{ tem-se}$$

$$R - Fe_{Hm} \cdot H_m - Fe_{Go} \cdot Go = 0 \quad (3)$$

Caso não se disponha do ataque sulfúrico da fração argila, pressupõe-se que todo o titânio esteja na ilmenita.

Nesse caso, o termo R transforma-se em

$$R = Fe_S - Ti_S \quad (4)$$

Numa mistura de hematita e goethita puras, na proporção 1:1 (JONES, 1981),

$$\frac{A_{Go}}{A_{Hm}} = 0,703, \text{ sendo}$$

A_{Go} a área do pico da goethita (110), no espaçamento de $4,13\text{\AA}$, e

A_{Hm} a área do pico da hematita (104), no espaçamento de $2,69\text{\AA}$.

Assim:

$$\frac{Go}{Hm} = \frac{A_{Go}}{A_{Hm} \cdot 0,703} \quad (5)$$

$$Hm = \frac{0,703 A_{Hm}}{A_{Go}} \cdot Go \quad (6)$$

Logo

$$Go = \frac{R - Fe_{Hm} \cdot Hm}{Fe_{Go}}, \text{ pela equação 3.}$$

Substituindo-a em 6, tem-se

$$Hm = \frac{0,703 A_{Hm}}{A_{Go}} \cdot \frac{R - Fe_{Hm} \cdot Hm}{Fe_{Go}}$$

Rearranjando:

$$Hm = \frac{R \cdot 0,703 A_{Hm}}{A_{Go} Fe_{Go}} - \frac{Fe_{Hm}}{Fe_{Go}} \cdot \frac{0,703 A_{Hm}}{A_{Go}} \cdot Hm$$

$$Hm + \frac{Fe_{Hm}}{Fe_{Go}} \cdot \frac{0,703A_{Hm}}{A_{Go}} \cdot Hm = \frac{R \cdot 0,703A_{Hm}}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}}$$

$$Hm \left(1 + \frac{Fe_{Hm}}{Fe_{Go}} \cdot \frac{0,703A_{Hm}}{A_{Go}} \right) = \frac{R \cdot 0,703A_{Hm}}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}}$$

$$Hm = \frac{\frac{R \cdot 0,703A_{Hm}}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}}}{1 + \frac{Fe_{Hm}}{Fe_{Go}} \cdot \frac{0,703A_{Hm}}{A_{Go}}}$$

Dividindo por $\frac{0,703A_{Hm}}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}}$, tem-se

$$Hm = \frac{\frac{R}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}}}{\frac{0,703A_{Hm}}{A_{Go} \cdot Fe_{Go}} + Fe_{Hm}} \quad (7)$$

Pela equação 3, $R = Fe_{Hm} \cdot K_m + Fe_{Go} \cdot Go$

Substituindo Hm pela expressão da equação 6, tem-se

$$R = \frac{Fe_{Hm} \cdot 0,703A_{Hm}}{A_{Go}} \cdot Go + Fe_{Go} \cdot Go$$

$$R = Go \left(\frac{Fe_{Hm} \cdot 0,703A_{Hm}}{A_{Go}} \right) + Fe_{Go} \cdot Go$$

$$Go = \frac{R}{0,703Fe_{Hm} \cdot \frac{A_{Hm}}{A_{Go}} + Fe_{Go}}$$

Mas

$$\% \text{ de Fe}_{\text{Go}} = \frac{276,6127 (1 - x)}{3,0732 - x}, \text{ sendo } x \text{ a substituição isomórfica}$$

de Fe por Al na goethita, dada em fração molar

Pressupondo $x = 0,3$

$$\% \text{ de Fe}_{\text{Go}} = 69,6953$$

$$\% \text{ de Fe}_{\text{Hm}} = \frac{276,6100 (1 - x)}{2,7661 - x}, \text{ sendo } x \text{ a substituição isomórfica}$$

de Fe por Al na hematita, dada em fração molar.

Admitindo $x = 0,05$

$$\% \text{ de Fe}_{\text{Hm}} = 96,7488$$

Substituindo na equação 7 e na equação 8, obtém-se

$$\text{Hm} = \frac{R}{\frac{A_{\text{Go}}}{A_{\text{Hm}}} \cdot 0,9945 + 0,9675} \quad (9)$$

$$\text{Go} = \frac{R}{\frac{A_{\text{Hm}}}{A_{\text{Go}}} \cdot 0,6850 + 0,6970} \quad (10)$$

7.2. Relações utilizadas na estimativa da composição mineralógica pelo método de RESENDE (1976)

1. Caolinita

$$K_a = \frac{\text{Si}_S}{\text{Si}_{K_a}}, \text{ considerando que todo o SiO}_2 \text{ esteja contido na caolinita, sendo}$$

- Ka = teor de caolinita no solo
 Si_S = teor de SiO_2 obtido pelo ataque sulfúrico
 Si_{Ka} = teor de SiO_2 na caolinita - 0,465
 Ka = 2,15 Si_S

2. Hematita

$$Hm = \frac{R}{\frac{Fe_{Go} A_{Go}}{0,708 A_{Hm}} + Fe_{Hm}}$$

$$\text{sendo } R = Fe_S - Ti_S + (Ti_{An} \cdot \frac{r}{100})$$

- Fe_S = teor de Fe_2O_3 obtido pelo ataque sulfúrico
 Ti_S = teor de TiO_2 obtido pelo ataque sulfúrico (solo)
 Ti_{An} = teor de TiO_2 obtido pelo ataque sulfúrico (argila)
 r = % de argila
 A_{Go} = área do pico da goethita (110), no espaçamento de $4,18\text{\AA}$
 A_{Hm} = área do pico da hematita (104), no espaçamento de $2,69\text{\AA}$
 Fe_{Go} = teor de Fe_2O_3 na goethita; para 30 mol % de substituição isomórfica de Fe por Al, $Fe_{Go} = 0,997$
 Fe_{Hm} = teor de Fe_2O_3 na hematita; para 5 mol % de substituição isomórfica de Fe por Al, $Fe_{Hm} = 0,967$. Quando não se dispõe do teor de TiO_2 da fração argila;

$$R = Fe_S - Ti_S$$

3. Goethita

$$Go = \frac{R}{0,708 Fe_{Hm} \cdot \frac{A_{Hm}}{A_{Go}} + Fe_{Go}}$$

Go = teor de goethita no solo

4. Gibbsita

$$\frac{Al_3 - Al_{Ka} \cdot Ka - Al_{Go} \cdot Go - Al_{Hm} \cdot Hm}{Al_{Gb}}$$

sendo

Gb = teor de gibbsita presente no solo

Al_{Ka} = teor de Al_2O_3 na caolinita; $Al_{Ka} = 0,395$

Al_{Go} = teor de Al_2O_3 na goethita; para 30 mol% de substituição isomórfica, $Al_{Go} = 0,191$

Al_{Hm} = teor de Al_2O_3 na hematita; para 5 mol% de substituição isomórfica, $Al_{Hm} = 0,0325$

Al_{Gb} = teor de alumínio na gibbsita; $Al_{Gb} = 0,654$

5. Se o valor obtido de Gb é negativo, então

$$Ka_{real} = Ka - \frac{Gb \cdot Al_{Gb}}{Al_{Ka}}$$

ou

$$Ka_{real} = Ka - 1,6557 |Gb|$$

|Gb| valor absoluto de Gb

A quantidade de Al_2O_3 retirado da caolinita é equivalente à de SiO_2 .

Logo,

$$Si_{Am} = 1,6557 |Gb| \times 0,405 = 0,7699 |Gb|$$

sendo Si_{Am} o teor de sílica amorfa no solo.

6. % de Al_2O_3 e Fe_2O_3 na hematita e na goethita, considerando a substituição isomórfica.

6.1. Hematita

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{275,6100 (1 - x)}{2,7661 - x}$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{176,6100 x}{2,7661 - x}$$

6.2. Goethita

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{275,6127 (1 - x)}{3,0782 - x}$$

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{176,6148 x}{3,0782 - x}$$

sendo x a substituição isomórfica de Fe por Al em fração molar.

7.3. Integração de curvas ajustadas entre fósforo disponível e fósforo absorvido

Para obtenção de uma única curva que relacione fósforo disponível e fósforo absorvido, é necessário determinar as distâncias X_1 , X_2 e X_3 (Figura 1A). Os níveis de fósforo aplicados estão identificados como P_1 , P_2 , P_3 e P_4 . A distância X_1 deve ser somada aos dados de fósforo absorvido no nível P_3 ; $X_1 + X_2$ aos dados de nível P_2 e $X_1 + X_2 + X_3$ aos dados do nível P_1 .

Exemplo de aplicação

1. Equações ajustadas entre fósforo disponível e fósforo absorvido

(Quadros 30 e 31):

$$\text{Nível } P_4 - Y = 151,03 - 0,9168X \quad (1)$$

$$\text{Nível } P_3 - Y = 98,07 - 0,9150X \quad (2)$$

$$\text{Nível } P_2 - Y = 36,14 - 0,5471X \quad (3)$$

$$\text{Nível } P_1 - Y = 25,53 - 1,77X + 0,0562X^2 \quad (4)$$

2. A distância X_1 equivale à diferença entre os valores do fósforo absorvido na equação 1 e na equação 2, para o mesmo teor de fósforo disponível (Y).

Tomando o valor de fósforo absorvido de 23,56, do primeiro cultivo no nível P_4 (Quadro 23), e aplicando-o na equação 2, tem-se

$$Y = 98,07 - 0,9150 (23,56) \quad \therefore \quad Y = 76,51$$

Aplicando esse valor de Y na equação 1, tem-se

$$76,51 = 151,03 - 0,9168X \quad \therefore \quad X = 31,28$$

Esse valor de X (31,28) corresponde à distância da origem até a reta do nível P_4 , para $Y = 76,51$. A distância X_1 será a diferença entre esse valor e a distância da origem até a reta do nível P_3 , para $Y = 76,51$.

$$\text{Logo, } X_1 = 31,28 - 23,56 = 57,72$$

3. Aplicando o mesmo raciocínio, obtém-se

$$X_2 = 62,57 \text{ e } X_3 = 30,27$$

Assim:

$$X_1 = 57,72$$

$$X_1 + X_2 = 120,29$$

$$X_1 + X_2 + X_3 = 151,26$$

Cada valor é somado aos pontos observados da curva respectiva, obtendo-se a população de pontos que dará origem à curva integrada (Figura 19).

7.4. Exemplo de cálculo para recomendação de adubação

Dados

- a. Extrator: Mehlich 1
- b. Teor de goethita no solo: 0,5%
- c. Relação entre o fósforo disponível e o nível crítico: 5% (P disponível - 2 $\mu\text{g P/g}$; nível crítico - 40 $\mu\text{g P/g}$)

Para o extrator de Mehlich 1, o nível crítico equivale a 60 kg P/ha, que podem ser absorvidos pelo vegetal. Como o solo apresenta 5% do nível crítico, faltam 95% para completá-lo, o que, expresso em kg P/ha, corresponde a $0,95 \times 60 = 57$ kg P/ha. Para determinar a quantidade de fósforo que deverá ser adicionada, é necessário conhecer a relação $\frac{P \text{ aplicado}}{P \text{ absorvido}}$. Essa relação pode ser estimada pela equação de regressão $Y = 1,95 + 0,22X$, na qual Y é a relação desejada e X o teor de goethita:

$$\text{para } X = 0,5, \quad Y = 2,06$$

Assim, devem ser adicionados $2,06 \times 57 = 117$ kg P/ha para que o teor de fósforo disponível pelo extrator Mehlich 1 atinja o nível crítico.

QUADRO 1/A - Análises químicas das amostras dos materiais de solo em estudo

Classe de solo	Identi- ficação	pH		Complexo sortivo do solo								V	C
		H ₂ O	KCl	H ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	T		
meq/100 g												%	
AQd	TM-5	5,0	4,2	2,90	0,90	0,40	0,43	0,11	0,002	0,94	4,74	20	0,99
LEdm	TM-6	5,5	5,0	3,60	0,20	2,90	1,17	0,15	0,003	4,22	8,02	53	1,22
LEdm	TM-18	5,0	4,3	3,53	0,60	0,98	0,48	0,16	0,002	1,62	5,75	28	0,91
LEdr	TM-42	5,7	5,2	3,80	0,16	5,68	1,69	0,18	0,001	7,56	11,52	66	1,83
LEdr	TM-14	4,9	4,2	5,63	1,30	0,37	0,25	0,20	0,003	0,82	7,75	11	1,49
LVar	TM-56	4,8	4,4	7,65	0,60	0,20	0,10	0,09	0,002	0,39	8,64	4	1,83
LEdr	AP-C13	4,7	4,2	13,15	1,70	0,54	0,26	0,15	0,002	0,95	15,80	6	3,08
LVar	TM-67	4,6	4,2	8,01	1,40	0,13	0,05	0,08	0,003	0,26	9,67	3	1,81

QUADRO 2A - Características físicas e químicas das amostras dos materiais de solo utilizadas

Característica	Classe de solo							
	AQd TM-5	LEdm TM-6	LEdm TM-18	LEdr TM-42	LEdr TM-14	LVar TM-56	LEdr AP-C13	LVar TM-57
. Composição granulométrica (%)								
- Areia grossa	15	28	7	28	14	11	2	9
- Areia fina	67	54	69	27	32	5	4	5
- Silte	10	8	11	18	17	20	25	13
- Argila	8	10	13	27	37	64	69	72
. Equivalente de unidade (%)	8	8	9	17	22	27	33	20
. Ataque pelo H_2SO_4 dens. 1,47 (%)								
- SiO_2	2,64	3,34	4,80	11,05	9,06	6,86	11,90	16,74
- Al_2O_3	2,68	3,57	4,53	9,75	14,27	36,27	26,83	33,39
- Fe_2O_3	3,74	4,09	8,28	7,24	11,03	12,43	14,97	11,88
- TiO_2	0,63	1,05	1,49	1,43	1,30	1,47	2,58	1,41

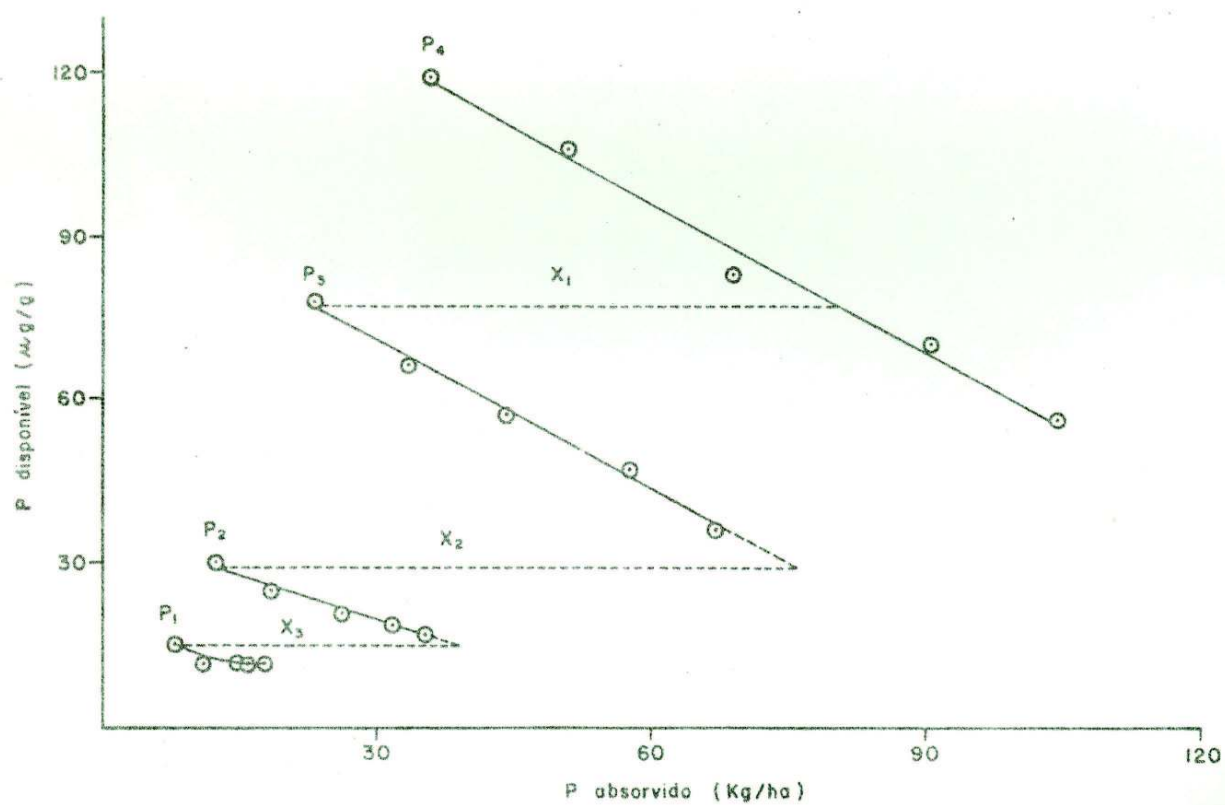


FIGURA 1A - Representação gráfica da metodologia empregada na integração das curvas obtidas entre P disponível e P absorvido.

QUADRO 3A - Teor de unidade, em relação ao potencial matricial, nos materiais de solo utilizados

Classe de solo	Identifi- cação	Potencial matricial (bar)								
		-1/10	-1/3	-1/2	-1,0	-0,3	-5,0	-10,0	-12,5	-15,0
% peso do solo										
AQd	TM-5	9,0	6,9	6,0	5,9	4,6	4,6	4,0	4,2	3,8
LEdm	TM-6	9,7	8,2	7,3	6,8	6,2	5,6	5,1	5,6	5,6
LEdm	TM-18	12,1	8,5	6,3	7,3	6,1	6,2	6,1	5,3	5,4
LEdr	TM-42	19,2	15,7	15,0	13,7	11,7	11,5	10,8	13,2	11,1
LEdr	TM-14	22,7	20,9	20,4	19,1	16,6	16,4	16,9	16,5	15,4
LVar	TM-56	28,3	25,9	25,3	24,3	22,5	22,0	22,7	22,1	20,3
LEdr	AP-C13	34,3	32,8	31,5	30,7	28,3	28,8	29,0	27,0	25,9
LVar	TM-67	31,4	27,5	26,8	26,0	24,0	23,8	22,3	22,5	21,6

QUADRO 4A - Dimensões, área e relações hematita/goethita (Hm/Go) e goethita/hematita (Go/Hm) obtidas dos picos de hematita (104) e goethita (110) nos difratogramas da fração argila, sem silicatos, na montagem em pó

Classe de solo	Identificação	Dimensões dos picos				Áreas dos picos		Relações	
		Largura		Altura		Hm	Go	Hm/Go	Go/Hm
		Hm	Go	Hm	Go				
		cm							
AQd	TM-5	0,610	0,240	1,105	0,480	0,3614	0,0576	6,27	0,16
LEdm	TM-6	0,590	0,295	1,245	0,410	0,3673	0,0605	6,07	0,16
LEdm	TM-10	0,520	0,315	1,355	0,380	0,3523	0,0599	5,00	0,17
LEdr	TM-42	0,525	0,220	1,315	0,390	0,3452	0,0429	8,05	0,12
LEdr	TM-14	0,470	0,255	1,410	0,640	0,3314	0,0816	4,06	0,25

QUADRO 5A - Teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1, em diferentes períodos de incubação, no tratamento que recebeu 250 $\mu\text{g P/g}$ solo (médias de três repetições)

Classe de solo	Identificação	Tempo de incubação (dias)							Coeficiente de variação
		2	3	4	5	6	9	12	
		$\mu\text{g P/g}$							%
AQd	TM-5	140,8	137,9	137,9	142,1	141,5	133,0	142,4	2,42
LEdm	TM-6	150,2	154,8	150,6	159,4	155,6	149,2	161,4	3,07
LEdm	TM-18	137,5	124,4	136,3	139,4	138,1	136,5	140,2	3,92
LEdr	TM-42	137,2	133,1	130,1	132,7	132,1	136,8	133,7	1,83
LEdr	TM-14	40,3	39,7	39,0	39,6	38,9	39,0	38,7	1,45
LVar	TM-56	8,5	9,7	9,2	9,7	9,5	9,0	8,9	4,87
LEdr	AP-C13	27,1	26,1	25,9	23,9	24,5	25,5	22,9	5,60
LVar	TM-37	15,9	16,8	16,3	16,0	14,9	14,6	14,0	5,43

QUADRO 6A - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelo extrator Mehlich 1, e doses de fósforo aplicadas (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo sem calagem

Classe de solo	Identificação	Coeficientes de regressão		Coeficiente de determinação (R^2)
		Interseção	Linear	
AQd	TM-5	-1,25	0,2801	0,995**
LEdm	TM-6	4,37	0,3069	0,997**
LEdm	TM-13	-1,53	0,2739	0,992**
LEdr	TM-42	4,38	0,2542	0,996**
LEdr	TM-14	-2,43	0,0770	0,959**
LVar	TM-56	0,22	0,0154	0,962**
LEdr	AP-C13	4,33	0,0362	0,993**
LVar	TM-57	-0,15	0,0287	0,981**

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 7A - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre pH em água (Y) e níveis de correção da acidez trocável (X) das amostras de material de solo

Classe de solo	Identificação	Coeficientes de regressão			Coeficiente de determinação (R ²)
		Interseção	Linear	Quadrático	
AQd	TM-5	5,53	1,34**		0,990** 3,80
LEdm	TM-6	5,58	0,96**		0,973** 3,80
LEdm	TM-10	4,90	2,42**	-0,42**	0,994** 4,13
LEdr	TM-42	5,79	1,00**		0,996** 3,96
LEdr	TM-14	4,66	3,42**	-0,85**	0,992** 6,93
LVar	TM-56	4,37	3,32**	-0,79**	0,998** 8,25
LEdr	AP-C13	4,48	2,68**	-0,55**	0,997** 14,85
LVar	TM-67	4,29	4,03**	-1,08**	0,998** 9,41

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 8A - Quantidade de corretivo (CaCO_3 e MgCO_3) adicionada aos materiais de solo para elevar o pH para 6,5³

Classe de solo	Identificação	Corretivo
		kg/ha
AQd	TM-5	2183
LEdm	TM-6	2304
LEdm	TM-18	2672
LEdr	TM-42	2100
LEdr	TM-14	4026
LVar	TM-56	5682
LEdr	AP-C13	12700
LVar	TM-67	5566

QUADRO 9A - Análises de fertilidade das amostras de material de solo com e sem calagem

Classe de solo	Resultados analíticos									
	pH em água		Al		Ca		Mg		K	
	s/cal	c/cal	s/cal	c/cal	s/cal	c/cal	s/cal	c/cal	s/cal	c/cal
	meq/100 g								μg/g	
AQd										
TM-5	5,0	6,5	0,60	0,00	0,52	1,86	0,54	0,72	56	54
LEdm										
TM-6	5,5	6,5	0,00	0,00	2,80	4,00	1,26	1,59	69	76
LEdm										
TM-18	4,9	6,4	0,35	0,00	1,08	2,73	0,60	0,95	80	73
LEdr										
TM-42	5,9	7,0	0,00	0,00	4,77	5,10	1,62	1,70	72	72
LEdr										
TM-14	4,7	6,6	0,65	0,00	0,30	2,64	0,22	0,83	80	80
LVar										
TM-56	4,8	6,6	0,30	0,00	0,08	2,84	0,06	0,75	32	35
LEdr										
AP-C13	4,9	6,5	0,60	0,00	0,36	5,52	0,21	1,59	50	62
LVar										
TM-67	4,6	6,4	0,65	0,00	0,05	2,88	0,02	0,79	25	30

QUADRO 10A - Doses de fósforo aplicadas e, entre parênteses, teores esperados de fósforo disponível, pelo extrator Mehlich 1, nas amostras de material de solo

Classe de solo	Identificação	Doses de fósforo aplicadas							
		kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g
AQd	TM-5 ✓	60	(16)	120	(32)	240	(66)	360	(100)
LEd	TM-6 ✓	50	(20)	100	(35)	200	(66)	300	(96)
LEd	TM-16 ✓	70	(16)	140	(37)	280	(75)	420	(114)
LEdr	TM-42 ✓	60	(20)	120	(35)	240	(65)	360	(96)
LEdr	TM-14 ✓	120	(7)	240	(16)	360	(25)	480	(35)
LVar	TM-56	170	(3)	340	(6)	510	(9)	680	(11)
LEdr	AP-C13	52	(6)	208	(12)	390	(18)	520	(23)
LVar	TM-67	160	(4)	320	(9)	480	(14)	640	(18)

QUADRO 11A - Composição química da solução nutritiva utilizada nos ensaios em estufa

Solução estoque	g/l	ml de solução-estoque por litro de solução nutritiva
NH_4NO_3	114,9096	50
KNO_3	42,0945	20
K_2SO_4	69,5652	50
Micronutrientes		100

Composição da solução-estoque de micronutrientes

Fonte	g/l na solução-estoque
H_3BO_3	0,9276
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,8862
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,0757
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1,5522
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ <i>Cu SO₄ 5H₂O 249,68</i>	0,7209
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	3,5180
Ácido cítrico*	10,0000

* Utilizado como agente estabilizador da solução.

QUADRO 12A - Síntese das principais alterações de metodologia dos experimentos de exaustão da concentração de fósforo adicionada

Cultivo	Duração	Peso do vaso	Nutriente aplicado									Observações
			N	K	S	B	Mn	Mo	Fe	Cu	Zn	
	Dias	kg	mg/vaso									
1. ^o	22	2,0	600	200	64	1,00	2,46	0,30	3,12	2,66	8,00	
2. ^o	25	1,9	600	200	64	-	-	-	-	-	-	Não foi efetuada aplicação de micro nutrientes. Feita a colheita, o solo foi corrigido com CaCO_3 e MgSO_4 e lavado. Retirada de amostra antes e depois da lavagem.
3. ^o	45	1,7	500	200	40	1,00	2,46	0,75	3,12	2,66	8,00	Não foi aplicado N no plantio. K parcelado em duas aplicações. Pulverização com solução de 140 mg Mo/l.
4. ^o	32	1,6	500	200	40	1,00	2,46	0,75	3,12	2,66	8,00	Mesmo parcelamento de N e K do experimento anterior.
5. ^o	30	1,5	400	100	-	-	-	-	-	-	-	Não foi efetuada a aplicação de K em vasos com acúmulo desse nutriente. Os demais nutrientes, exceto N, não foram adicionados.

QUADRO 13A - Quantidade de fósforo removida por lavagem dos vasos com material de solo depois do segundo cultivo (média de três repetições)^{1/}

Classe de solo	Identificação	Doses de fósforo aplicadas			
		kg/ha			
AQd	TM-5	50 (0,12)	120 (0,07)	240 (0,27)	360 (1,85)
LEdm	TM-6	50 (1,84)	100 (1,25)	200 (3,59)	300 (8,37)
LEqm	TM-18	70 (0,12)	140 (0,10)	280 (0,12)	420 (0,10)
LEdr	TM-42	50 (0,12)	120 (0,34)	240 (1,93)	360 (6,17)
LEdr	TM-14	120 (0,10)	240 (0,08)	360 (0,18)	480 (0,21)
LVar	TM-56	170 (0,04)	340 (0,05)	510 (0,14)	680 (0,27)
LEdr	AP-C13	52 (0,11)	208 (0,08)	390 (0,13)	520 (0,12)
LVar	TM-67	150 (0,08)	320 (0,11)	480 (0,19)	640 (0,29)

^{1/} Os números entre parênteses representam as quantidades de fósforo removidas (kg/ha).

QUADRO 14A - Composição mineralógica das amostras dos materiais de solo, calculada a partir dos teores de óxidos obtidos pelo ataque sulfúrico

Classe de solo	Identificação	Composição mineralógica							Total
		Caolinita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Ilmenita	Anatásio	SiO ₂ amorfa	
		%							
AQd	TM-5	5,68	2,86	0,64	0,34	0,91	0,15	-	10,58
LEdm	TM-6	7,18	2,91	0,58	0,78	1,52	0,25	-	13,32
LEdm	TM-18	10,20	6,40	1,54	-	1,94	0,47	0,06	20,61
LEdr	TM-42	23,71	5,83	1,02	-	1,67	0,55	0,02	32,80
LEdr	TM-14	19,84	8,48	2,95	8,55	1,46	0,53	-	41,81
LVar	TM-56	14,75	-	17,44	41,15	0,53	1,19	-	75,06
LEdr	AP-C13	25,59	-	21,49	19,29	-	2,58	-	68,95
LEdr	TM-67	34,92	-	16,59	25,12	0,61	1,09	-	78,33

QUADRO 15A - Análises de variância dos dados de produção de matéria seca de milho nos diferentes cultivos (quadrados médios)

Fonte de variação	GL	Cultivos				
		1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
Tratamentos	31	65,28**	24,49**	37,03**	22,78**	12,46**
Erro	64	0,38	0,44	0,65	0,33	0,25
TOTAL	95					
C.V. %		5,51	11,19	14,85	13,34	12,42

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 16A - Análises de variância dos dados de quantidade de fósforo removido nos diferentes cultivos (quadra - dos médios)

Fonte de variação	GL	Cultivos				
		1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
Tratamentos	31	974,70**	228,12**	175,11**	129,05**	69,52**
Erro	64	14,64	2,28	1,81	1,17	1,57
TOTAL	95					
C.V. %		12,63	12,24	14,93	14,22	18,06

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 17A - Análises de variância dos dados de teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Mehlich 1 (quadrados médios)

Fonte de variação	GL	Cultivos				
		1.º	2.º	3.º	4.º	5.º
Tratamentos	31	3306,97**	2419,33**	1445,15**	868,40**	256,24**
Erro	64	8,43	4,17	4,31	5,96	2,30
TOTAL	95					
C.V. %		8,95	7,56	9,60	13,59	10,67

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 10A - Análises de variância dos dados de teores de fósforo disponível obtidos pelo extrator Bray 1 (quadrados médios)

Fonte de variação	GL	Cultivos				
		1. ^o	2. ^o	3. ^o	4. ^o	5. ^o
Tratamentos	31	2925,72**	2315,44**	1461,37**	927,06**	728,31**
Erro	64	6,84	3,77	4,19	3,74	1,19
TOTAL	95					
C.V. %		6,85	5,68	7,02	7,53	4,68

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 19A - Análises conjuntas de variância dos dados de produção de matéria seca e fósforo removido e dos teores de fósforo disponível, obtidos pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1 (quadrados médios)

Fonte de variação	GL	Matéria seca	Fósforo removido	Fósforo disponível	
				Mehlich 1	Bray
Tratamentos	31	78,64**	1049,21**	7577,09**	7740,19**
Cultivos	4	65,56**	9139,79**	5016,67**	3638,34**
Interação					
Tratamentos x Cultivos	124	20,85**	131,82**	236,20**	154,68**
Erro		0,41	4,29	5,03	3,95
TOTAL	479				
C.V. %		10,35	15,65	9,91	6,60

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 20A - Coeficientes das equações de regressão ajustadas entre teor de fósforo disponível (Y), em $\mu\text{g/g}$, obtido pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, e fósforo aplicado (X), em kg/ha , nas amostras de material de solo utilizadas no cultivo sucessivo

Classe de solo	Identificação	Coeficientes da regressão (Mehlich 1)		Coeficiente de determinação (R^2)	Coeficientes da regressão (Bray 1)		Coeficiente de determinação (R^2)
		Interseção	Linear		Interseção	Linear	
AQc	TM-5	-8,24	0,3922	0,996**	-0,97	0,3727	1,000**
LEdm	TM-6	2,75	0,3671	0,993**	5,00	0,3370	0,996**
LEdm	TM-16	0,99	0,3097	0,982**	1,01	0,3432	0,999**
LEdr	TM-42	-4,65	0,2759	0,958*	0,66	0,1891	0,996**
LEdr	TM-14	-3,96	0,0796	0,992**	-4,84	0,1265	0,994**
LVar	TM-56	-1,48	0,0224	0,989**	-1,64	0,0573	0,999**
LEdr	AP-C13	4,09	0,0313	1,000**	6,67	0,0573	0,995**
LVar	TM-67	-2,86	0,0354	0,984**	-4,49	0,0635	0,995**

* - Excede o nível de probabilidade de 5%.

** - Excede o nível de probabilidade de 1%.

QUADRO 21A - Doses de fósforo aplicadas e, entre parênteses, teores estimados de fósforo disponível, pelos extratores Mehlich 1 e Bray 1, nas amostras de material de solo com calagem antes do cultivo

Classe de solo	Identificação	Extrator	Níveis de fósforo aplicados							
			kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g	kg/ha	µg/g
AQd	TM-5	Mehlich 1	60	(15,3)	120	(38,8)	240	(85,9)	360	(132,0)
		Bray 1		(21,4)		(43,8)		(88,5)		(133,2)
LEdm	TM-6	Mehlich 1	50	(21,1)	100	(39,5)	200	(76,2)	300	(112,9)
		Bray 1		(21,9)		(38,7)		(72,4)		(106,1)
LEdm	TM-18	Mehlich 1	70	(20,7)	140	(42,4)	280	(85,7)	420	(129,1)
		Bray 1		(25,0)		(49,1)		(97,1)		(145,2)
LEdr	TM-42	Mehlich 1	60	(11,9)	120	(28,5)	240	(61,6)	360	(94,7)
		Bray 1		(12,0)		(23,3)		(46,0)		(58,7)
LEdr	TM-14	Mehlich 1	120	(5,6)	240	(15,1)	360	(24,7)	480	(34,3)
		Bray 1		(10,3)		(25,5)		(40,7)		(55,9)
LVar	TM-56	Mehlich 1	170	(2,3)	340	(6,1)	510	(9,9)	580	(13,7)
		Bray 1		(8,1)		(17,8)		(27,6)		(37,3)
LEdr	AP-C13	Mehlich 1	52	(5,7)	208	(10,6)	390	(16,3)	520	(20,4)
		Bray 1		(9,7)		(18,6)		(29,0)		(36,5)
LVar	TM-67	Mehlich 1	160	(2,8)	320	(8,5)	480	(14,1)	640	(19,8)
		Bray 1		(8,9)		(22,3)		(35,6)		(49,0)