

TESTE DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAR A ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DA SOJA EM SOLOS SOB CERRADO COM DIFERENTES TEORES E TIPOS DE ARGILA⁽¹⁾

I. D. G. LINS^(2,5), F. R. COX⁽³⁾ & D. M. G. SOUZA⁽⁴⁾

RESUMO

Testou-se um modelo matemático, previamente desenvolvido, para estimar as doses de fósforo que devem ser aplicadas em solos de cerrado para cultivar soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]. Esse modelo foi construído com base na produção de grãos, fósforo extraível do solo pelo Mehlich-1 e teor de argila de três solos caulíníticos do Estado de Mato Grosso do Sul, com teores de argila entre 12 e 63%. Para ampliar esse modelo, coletaram-se, por seis anos, dados dos mesmos solos, e incluíram-se os de dois outros com contrastes mineralógicos, os quais continham 57 e 68% de argila. Para validar o modelo, cultivou-se soja por um ano em dois solos com teores de argila de 21 e 27%, sendo o primeiro gibbsítico. Quando o modelo foi testado, usando-se as doses econômicas calculadas para os cinco experimentos, em uma equação de regressão múltipla não linear, obteve-se um $R^2 = 0,86$. O ajuste entre as doses ótimas de fósforo calculadas e observadas foi bom para todos os solos, com exceção daquele com 68% de argila, gibbsítico. O modelo mostrou-se válido, portanto, para os solos caulíníticos. Por essa razão, o gibbsítico foi descartado e um novo modelo foi construído com dados dos quatro solos caulíníticos. O valor de R^2 , obtido para este modelo, foi de 0,95. O mesmo também mostrou ser válido para o solo caulínítico cultivado com soja por um ano. Concluiu-se que há necessidade de calibrar, separadamente, os solos gibbsíticos dos caulíníticos e que o modelo aqui proposto pode ser usado com grande probabilidade de sucesso nos segundos.

Termos de indexação: Soja, adubação fosfatada, análise de solos, cerrado.

SUMMARY: *TEST OF A MATHEMATICAL MODEL TO OPTIMIZE P FERTILIZATION FOR SOYBEAN GROWN ON CERRADO SOILS WITH DIFFERENT TYPES AND CONTENTS OF CLAY*

A model had been, previously developed with the objective of predicting the amount of P fertilizer that should be applied when growing soybeans [Glycine max (L.) Merrill] in the cerrado area. It was based on the yields obtained during four years in three kaolinitic soils of the State of Mato Grosso do Sul, Brazil, on the clay contents, which varied from 12 to 63%,

(1) Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, defendida na Universidade Estadual de North Carolina, EUA, em 1987. Apresentado no XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Campinas, SP, em 19-25 de julho de 1987. Recebido para publicação em novembro de 1987 e aprovado em fevereiro de 1989.

(2) Pesquisador da EMPAER, Parque dos Poderes, Bloco 12. Caixa Postal 471, CEP 79046 Campo Grande, MS.

(3) Professor Titular do Departamento de Solos da NCSU, Raleigh, NC, 27695-7619, USA.

(4) Pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), EMBRAPA, Caixa Postal 70.0023. CEP 73300 Planaltina, DF.

(5) Bolsista do CNPq.

and on the Mehlich-1 extractable P data. In order to test this model, data were collected from these three long-term P experiments for a few more years and from two additional sites. With the objective of validating the model, soybeans were grown for one year on sites with 21 and 27% clay. The 21% clay soil was gibbsitic too. When the model was refined using data from the five long-term P experiments, the R^2 of the quadratic regression model was 0.86. The predicted optimum P rates fit the calculated ones closely for all soils except the one with 68% clay, which was gibbsitic. Also, the validation studies showed that the model fit the kaolinitic site well but not the gibbsitic one. Therefore, the gibbsitic site was deleted and a model created from the four long-term P experiments on kaolinitic soils. With this model the R^2 obtained was 0.95. It was also validated properly with the data from the one kaolinitic site. It is apparent that a separate calibration should be conducted to model the P recommendation for gibbsitic soils, and that the current model might be used with success on kaolinitic soils.

Index terms: Soybean, phosphate fertilizations, soils analyses, cerrado.

INTRODUÇÃO

A recomendação de adubação fosfatada tem-se realizado, de maneira geral, através dos teores extraíveis de P de uma amostra composta de solos. O nível crítico de P pode ser definido como a concentração de P acima da qual a probabilidade de resposta à adubação fosfatada decresce; entretanto, varia de acordo com certas propriedades do solo (Cope Jr. & Rouse, 1973; Kamprath, 1978; Cox & Lins, 1984).

Tentativas têm sido realizadas visando combinar um parâmetro do fator capacidade com o teor de P extraível, para estimar mais precisamente a disponibilidade de fósforo às plantas. Ozanne & Shaw (1968), trabalhando com forrageiras, observaram que 91% da variação na quantidade de fertilizante fosfatado, para otimizar as produções, poderia ser explicada pelas variáveis de fósforo extraível com 0,5 M NaHCO₃ e capacidade de tampão de fósforo. Miranda & Volkweiss (1981), trabalhando com doze solos do Rio Grande do Sul, concluíram que o poder tampão de fósforo e o teor de argila contribuíram mais do que a concentração de fósforo extraível do solo para determinar a necessidade de fertilizante fosfatado na cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. Concluíram também que a combinação das duas propriedades mencionadas e o teor de fósforo extraível forneceram melhor condição para avaliar a necessidade de adubação fosfatada para essa cultura.

Cox & Lins (1984) desenvolveram um modelo para estimar a dose mais econômica do fósforo na cultura do milho (*Zea mays* L.), em dois solos podzólicos da Carolina do Norte com diferentes teores de argila. Esse modelo considera a produção de grãos em função do teor de P extraível; a quantidade de fertilizante fosfatado que deve ser aplicada para se atingir uma concentração de fósforo no solo por determinado período de tempo e, finalmente, o efeito do teor de argila sobre tais relações. O modelo foi implantado por Lins et al. (1985) para soja cultivada por quatro anos consecutivos, em três solos cauliniticos do Estado de Mato Grosso do Sul, com diferentes teores e tipos de argila. Este trabalho testa a validade do modelo, visando recomendar adubação fosfatada para a cultura da soja nos Cerrados, utilizando dados experimentais coletados por um período médio de seis anos em cinco localidades.

MATERIAL E MÉTODOS

Experimentos de campo — Foram realizados sete experimentos de campo, sendo quatro no Estado de Mato Grosso do Sul e três no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), em Planaltina, DF. Algumas características físicas, químicas e mineralógicas dos sete solos incluídos neste estudo encontram-se no quadro 1.

Quadro 1. Características físicas, químicas e mineralógicas dos sete solos utilizados neste estudo em condições naturais

Argila	pH	Al	Ca + Mg	K	P	NC ⁽¹⁾	Gibbsita	Goetita ⁽²⁾	Caulinita
%	(1:2,5 H ₂ O)	—meq/100cm ³ —			g/cm ³	t/ha	—% no solo—		
68	5,0	0,63	0,32	0,07	0,6	2,94	44,2	3,4	20,4
63	4,9	1,12	0,68	0,10	1,7	3,36	12,6	14,5	28,4
57	4,8	1,30	0,36	0,07	1,6	4,24	6,7	7,2	28,8
27	4,6	1,26	0,95	0,12	3,9	3,57	0,5	3,0	20,3
27 ⁽³⁾	5,0	1,10	0,84	0,13	1,1	3,36	1,7	—	10,6
21 ⁽³⁾	5,7	0,30	0,34	0,07	0,6	2,26	17,9	2,1	1,1
12	5,2	0,34	1,04	0,09	5,0	1,64	0,1	2,3	7,8

(¹) Necessidade de calcário. (²) Determinação não realizada para o solo com 27% de argila e cultivado com soja por um ano. (³) Solos cultivados com soja por um ano com o objetivo de validar o modelo proposto neste trabalho.

Os experimentos do CPAC/EMBRAPA foram conduzidos nos seguintes solos: (1) latossolo vermelho-amarelo, argiloso; (2) latossolo vermelho-amarelo; franco-argilo-arenoso e (3) latossolo vermelho-escuro, argiloso. Os dois primeiros possuem a gibbsita como mineral predominante da fração argila, enquanto o terceiro é caulinitico. O teor de argila no horizonte Ap dos três solos é 68, 21 e 57% respectivamente. O quarto experimento do Estado de Mato Grosso do Sul também estava situado em um latossolo vermelho-escuro, de textura franco-argilo-arenosa, com 27% de argila, sendo a caulinita o mineral predominante. No entanto, seu teor de gibbsita era maior do que o do solo com igual teor de argila de MS. Os dois locais estão separados por 180km aproximadamente.

A necessidade de calcário dos sete locais foi calculada com base nos teores de Al, Ca e Mg trocáveis. Utilizou-se o calcário dolomítico, sendo a aplicação e a incorporação realizadas 90 dias antes do plantio. As quantidades aplicadas encontram-se no quadro 1. Nos solos com 63, 27 e 12% de argila do MS, reaplicou-se calcário dolomítico após a quinta colheita, sendo sua dose também calculada pelo método supramencionado.

Empregaram-se cinco níveis de fósforo, no primeiro ano, nos experimentos de longa duração, usando-se como fonte de P o superfosfato triplo (46% P_2O_5), para fornecer doses de P equivalentes a 0, 66, 132, 264 e 528kg ha^{-1} .

O solo com 27% de argila e maior teor de gibbsita e aquele com 21% de argila, não receberam a dose mais alta de P. As parcelas dos sete experimentos, que mediam 4,8 X 10,0m, foram distribuídas em um delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. A soja foi cultivada por um período médio de seis anos, nos cinco experimentos de longa duração, e por um ano, nos outros dois locais.

A adubação básica, no sulco, constituiu-se de doses de potássio, anuais, na forma de cloreto de potássio, que variaram de 50-120kg ha^{-1} de K_2O e 30kg ha^{-1} de S. Aplicaram-se também a cada três anos, no sulco de plantio, em kg ha^{-1} 3,0 de Zn (sulfato de zinco), 1,0 de B (bórx) e 0,2 de Mo (molibdato de amônio). As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium*, não se realizando a adubação nitrogenada.

A amostragem de solo foi feita antes do plantio e após cada colheita, a uma profundidade de 0-20cm, sendo composta de vinte subamostras por parcela. Estas foram secas ao ar e passadas em peneira de 2,0mm. O pH foi determinado em água, na relação solo:solução de 1:2,5. O Al, Ca e Mg foram extraídos com uma solução KCl 1N, sendo o Al determinado por titulação, com NaOH 0,025 N e azul-de-bromotimol, até a viragem de cor verde, e o Ca e Mg, por espectrofotometria de absorção atômica. O K e o P foram extraídos pelo método Mehlich-1 (0,05 M HCl + 0,0125 M H_2SO_4), na relação solo:solução de 1:10, agitando-se por cinco minutos. Determinou-se o K por fotometria de chama e o P pelo método do molibdênio azul, com leitura em espectrofotômetro. A análise granulométrica foi feita pelo método da pipeta, descrito pela EMBRAPA (1979).

As análises mineralógicas de fração argila foram realizadas no laboratório de mineralogia do Departamento de Solos da Universidade Estadual da Carolina do Norte.

Modelo matemático — O P extraível do solo (X) foi expresso em função de: (a) teor de fósforo extraível em condições naturais (X_0); (b) teor de fósforo extraível após a aplicação de fertilizante fosfatado (X_i); (c) dose de fertilizante aplicado (F); e (d) tempo após a aplicação do fertilizante fosfatado. O modelo descritivo, desenvolvido por Cox et al. (1981), foi utilizado como uma das equações componentes deste modelo modificado para considerar diferentes teores de fósforo extraíveis do solo.

No modelo desenvolvido por esses autores, o teor de P extraível, logo após a aplicação do fertilizante fosfatado (F), pode ser estimado somente no caso de um único nível de fósforo ter sido aplicado em determinado solo, cujo teor de P extraível em condições naturais (X_0) seja conhecido, através da seguinte equação quadrática:

$$X = X_0 + b_1 F + b_2 F^2 \quad (1)$$

onde b_1 e b_2 são coeficientes relacionados ao fator capacidade.

O termo X_0 da equação 1 foi substituído por $X_0 - X_i$, que nada mais é que a diferença entre o teor de P extraível em condições naturais e o teor de fósforo extraível de um solo, que anteriormente foi cultivado e recebeu adubação fosfatada. A segunda modificação substituiu o termo b_1 por um fator E, o qual nada mais é que o numerador da solução da equação quadrática (equação 1). Com essas modificações, a equação 1 passa a ser a seguinte:

$$E = -b_1 + \sqrt{[b_1^2 - 4b_2(X_0 - X_i)]} \quad (2)$$

Com essas mudanças, para facilitar o uso do modelo expresso pela equação 1 e com a inclusão de uma função exponencial para estimar o teor de P extraível, após certo tempo em que o fertilizante fosfatado foi aplicado, a equação proposta para estimar o teor de fósforo extraível do solo é:

$$X = X_{eq} + [X_i + (b_1 + E) F + b_2 F^2 - X_{eq}] \exp(-KT) \quad (3)$$

onde: K: perda constante de fósforo com o tempo em anos (T), após a aplicação de fertilizantes fosfatados; X_{eq} : concentração de fósforo em equilíbrio, obtido nas parcelas testemunhas, após anos de cultivo com soja. O valor considerado foi aquele que permaneceu praticamente o mesmo de um ano para outro.

Os dados obtidos nos cinco experimentos, por um período médio de seis anos, foram ajustados ao modelo expresso pela equação 3, utilizando-se PROC NLIN do pacote SAS (SAS Inst., Inc., 1985).

Um modelo não-linear foi utilizado para expressar as produções médias de grãos (y), em função dos teores extraíveis de fósforo dos cinco experimentos cultivados com soja por seis anos, através da equação:

$$Y = A - B \exp(-CX) \quad (4)$$

onde A, B e C são constantes.

Substituindo-se o valor de X da equação 4 pela equação 3, obteve-se:

$$Y = A - B \exp \{-C [X_{eq} + [X_i + (b_1 + E) F + b_2 F^2 - X_{eq}] \exp(-KT)]\} \quad (5)$$

Considerando-se que o lucro da soja pode ser expresso pela equação:

$$N = QY - SF \quad (6)$$

onde:

N: lucro líquido; Q: preço da soja por quilograma, e S: custo por unidade de quilograma de P.

Substituindo-se Y da equação 6 pela equação 5, obtém-se:

$$N = Q \{A - B \exp \{-C [X_{eq} + [X_i + (b_1 + E) F + b_2 F^2 - X_{eq}] \exp(-KT)]\} - SF \quad (7)$$

Considerando o período de um ano ($T = 1$), a derivada do lucro líquido foi tomada com relação à dose de fertilizante fosfatado (F) e igualada a zero, como segue:

$$0 = -QB \exp \{-C [X_{eq} + [X_i + (b_1 + E) F + b_2 F^2 - X_{eq}] \exp(-KT)]\} (-C) \exp(-K) [(b_1 + E) + 2b_2 F] - S \quad (8)$$

A solução da equação 8 resultou no lucro máximo a ser obtido por quilograma de P a ser aplicado, em função do teor de fósforo extraível dos cinco experimentos incluídos neste estudo. Isso foi conseguido, calculando-se a dose ótima de P a ser aplicada em cada solo, considerando-se seis valores de P extraível: o primeiro foi igual ou muito próximo a X_0 (teor de P extraível em condições naturais) e, os demais, foram crescentes e igualmente espaçados entre X_0 e certo valor para o qual a dose de P recomendada era muito próxima a zero. Coincidentemente, as doses de P recomendadas aproximaram-se de zero, quando o teor de P extraível dos cinco solos estava próximo do nível crítico de P estabelecido para cada um deles.

As doses mais econômicas de P, estimadas pela equação 8 para cada um dos cinco solos, foram depois avaliadas através de análise de regressões múltiplas do tipo da equação seguinte:

$$\text{Dose de P (kg/ha}^{-1}\text{)} = a + b (\text{P-extraível}) + c (\% \text{ de argila})^2 + d (\text{P-extraível}) (\% \text{ de argila})^2 \quad (9)$$

A resolução da equação 9 resulta na dose de fertilizante fosfatado para atingir o máximo rendimento econômico, e a unidade de P extraível a ser utilizada é kg ha^{-1} .

Quadro 2. Teores de P extraível pelo Mehlich-1 obtidos anualmente, por um período médio de seis anos, em cinco solos com diferentes teores de argila que receberam em condições nativas cinco níveis de fósforo

Teor de argila	Níveis de fósforo	Anos						
		1	2	3	4	5	6	7
%	kg/ha ⁻¹	μg cm ⁻³						
68	0	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,6
	66	1,8	1,8	1,4	1,1	1,0	1,0	0,9
	132	3,6	6,7	2,0	2,2	1,2	1,5	1,3
	264	7,4	7,1	4,0	3,1	3,3	2,8	2,2
	528	19,5	14,2	9,3	9,8	7,8	6,3	5,9
63	0	1,8	1,4	0,9	1,7	0,8	0,8	—
	66	4,8	2,5	1,6	2,3	1,5	1,5	—
	132	8,9	5,6	3,3	3,4	2,3	2,2	—
	264	19,5	9,6	7,1	6,9	4,4	4,9	—
	528	41,8	20,9	21,5	15,9	11,7	15,2	—
57	0	1,6	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	—
	66	3,0	2,7	2,2	1,8	1,6	1,9	—
	132	7,0	4,4	4,3	3,2	3,3	3,3	—
	264	16,5	11,1	10,3	7,5	6,1	6,6	—
	528	52,6	28,6	28,6	18,3	22,4	20,2	—
27	0	3,9	3,4	2,9	3,0	1,7	1,4	—
	66	10,9	8,4	5,1	4,5	2,5	2,0	—
	132	24,6	13,2	11,2	8,5	4,9	4,5	—
	264	44,6	31,4	21,2	20,0	13,0	14,1	—
	528	97,3	61,6	58,4	48,3	32,8	31,5	—
12	0	5,1	3,8	3,1	3,0	2,8	—	—
	66	12,2	11,8	8,5	6,8	6,0	—	—
	132	26,6	17,8	13,8	12,3	9,6	—	—
	264	60,9	41,6	47,4	31,0	29,2	—	—
	528	135,7	116,0	85,0	72,5	65,1	—	—

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito de doses de fósforo aplicadas ao solo sobre o teor de fósforo extraível pelo Mehlich-1, em função do tempo, após a aplicação do fósforo, é mostrado na figura 1. O teor de fósforo extraível pelo Mehlich 1 aumentou à medida que se aumentaram as doses de fósforo em todos os solos, sendo esse efeito mais pronunciado nos solos com menores teores de argila. Isso se relaciona com o fator capacidade ou poder tampão de fósforo de tais solos, o qual diminui à medida que o teor de argila decresce. O fósforo extraível, em função do tempo após a aplicação das

cinco doses de fósforo utilizadas, decresceu mais rapidamente à medida que se elevaram as doses de fósforo, como se pode observar no quadro 2. A menor e a maior perda de P extraível, em função do tempo, em todos os solos, ocorreram para as doses de 0 a 528 kg ha^{-1} de P respectivamente, como mostra a figura 1.

Os coeficientes obtidos com o modelo expresso pela equação 3, bem como as equações exponenciais ajustadas aos dados de produção de grãos (Quadro 3) são mostrados, respectivamente, nos quadros 4 e 5.

As quantidades de fósforo recomendadas para os solos com 68, 63 e 57% de argila, quando seu teor de

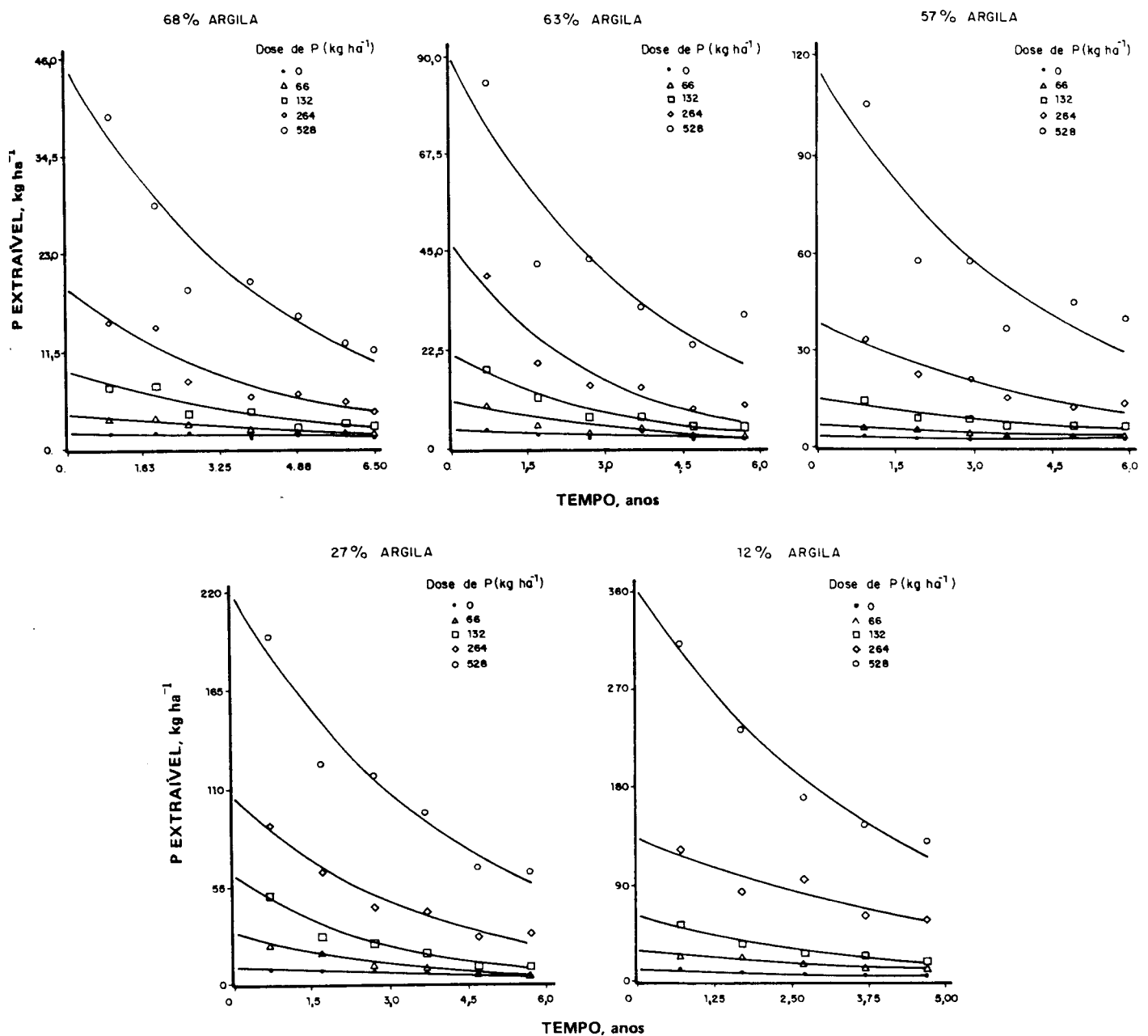


Figura 1. Teores de P-extraível (Mehlich-1) de cinco solos, com diferentes teores de argila, em função do tempo (anos) após a aplicação de cinco doses de P.

fósforo extraível é baixo, são maiores do que àquelas indicadas para os dois solos com menores teores de argila.

Entretanto, as doses de fósforo recomendadas para os solos argilosos diminuem drasticamente à medida que o teor de fósforo extraível sofre pequenos aumen-

Quadro 3. Produção de grãos de soja obtidos nos cinco solos com diferentes teores de argila e cultivados por um período médio de seis anos, em função das doses de fósforo aplicadas

Teor de argila	Doses de P aplicadas	Produção de grãos ⁽¹⁾						
		Anos						
		1	2	3	4	5	6	7
		kg ha ⁻¹						
68	0	110	396	08	46	74	40	69
	66	623	677	787	511	293	311	279
	132	659	1.277	1.300	937	644	685	514
	264	516	1.700	1.859	1.744	1.210	1.947	1.382
	528	518	2.042	2.036	2.233	1.118	3.708	2.506
63	0	844	733	631	477	212	180	—
	66	1.903	2.562	2.506	1.598	593	522	—
	132	2.094	2.869	2.991	2.677	1.566	1.316	—
	264	2.288	2.821	3.040	3.184	2.440	2.419	—
	528	2.227	2.853	2.997	3.052	2.228	2.743	—
57	0	104	207	137	195	128	74	—
	66	1.910	1.545	590	998	700	243	—
	132	2.740	1.735	927	1.159	1.376	584	—
	264	2.943	1.859	1.150	1.719	2.002	1.082	—
	528	3.254	1.923	1.470	1.940	2.314	1.527	—
27	0	1.407	995	1.444	866	582	630	—
	66	1.934	2.095	2.714	1.775	1.181	1.154	—
	132	2.341	2.448	3.100	3.108	2.089	1.845	—
	264	2.183	2.503	2.862	3.632	2.419	3.407	—
	528	2.459	2.709	2.953	3.548	2.689	3.626	—
12	0	1.111	997	1.310	966	357	—	—
	66	1.408	1.645	2.227	1.788	1.197	—	—
	132	1.617	1.858	2.221	1.940	1.700	—	—
	264	1.785	1.924	2.092	2.337	2.190	—	—
	528	1.818	2.125	2.263	2.261	2.501	—	—

(1) Média de quatro repetições.

Quadro 4. Coeficientes obtidos para a equação 3 para os cinco solos com diferentes teores de argila cultivados com soja por um período médio de seis anos

Coeficientes	Teor de argila				
	68	63	57	27	12
	%				
Xeq	1,04	1,60	2,50	2,96	5,62
Xo	1,20	3,70	3,34	7,80	10,00
b ₁	0,0413	0,0996	0,0479	0,2624	0,3136
b ₂	0,00079	0,00014	0,00031	0,00028	0,00066
K	0,2493	0,3083	0,2493	0,2596	0,2463

Quadro 5. Equações de produção de grãos e R² obtidos em função do teor de fósforo extraível pelo Mehlich-1, através da equação 4, para os cinco solos com diferentes teores de argila, cultivados com soja por um período médio de seis anos

Teor de argila	Equações	R ²
68	$Y = 1.778 - 2.775 e^{-0,34X^{(1)}}$	0,79
63	$Y = 2.706 - 4.523 e^{-0,33X}$	0,85
57	$Y = 2.071 - 3.081 e^{-0,20X}$	0,79
27	$Y = 2.860 - 3.533 e^{-0,14X}$	0,81
12	$Y = 2.068 - 2.327 e^{-0,11X}$	0,90

(1) X = Teor de P extraível pelo Mehlich-1.

tos. O modelo (equação 8) não indica a aplicação de fósforo se seu teor extraível nos solos com 68, 63, 57, 27 e 12% de argila for, respectivamente, igual ou superior a 8, 12, 14, 25 e 27 kg ha⁻¹, conforme mostra a figura 3.

Usando-se uma equação linear entre as doses mais econômicas de fósforo a aplicar nos cinco solos, as quais foram calculadas pela equação 8, em função do teor de fósforo extraível de tais solos, obteve-se:

$$\text{Dose de P (kg ha}^{-1}\text{)} = 95,8 - 4,04 (\text{P-extraível}) \quad (10)$$

O coeficiente de determinação obtido para a equação 10 foi de 0,66. Entretanto, quando o teor de argila elevado ao quadrado foi introduzido em uma análise de regressão múltipla, o coeficiente de determinação obtido foi de 0,86 e, a equação, a seguinte:

$$\text{Dose de P (kg ha}^{-1}\text{)} = 98,8 - 3,22 (\text{P-extraível}) + 0,0037 (\% \text{ de argila})^2 - 0,0013 (\text{P-extraível}) (\% \text{ argila})^2 \quad (11)$$

As doses de fósforo a serem aplicadas nos cinco solos calculados pela equação 11, são mostradas pelas linhas na figura 3. Com exceção do solo com 68% de argila, os valores estimados pela equação 11 ajustam-se bem àqueles calculados pelo modelo expresso pela equação 8. Observa-se que os valores estimados pela equação 11, para o solo com 68% de argila, quando comparados aos dados calculados pela equação 8, estão subestimados para os teores de P extraível menores que 2,0 kg ha⁻¹ e superestimados para os maiores que esse valor.

Pelo quadro 1, nota-se que tal solo (68% de argila) é gibbsítico, enquanto os outros quatro têm a caulinita

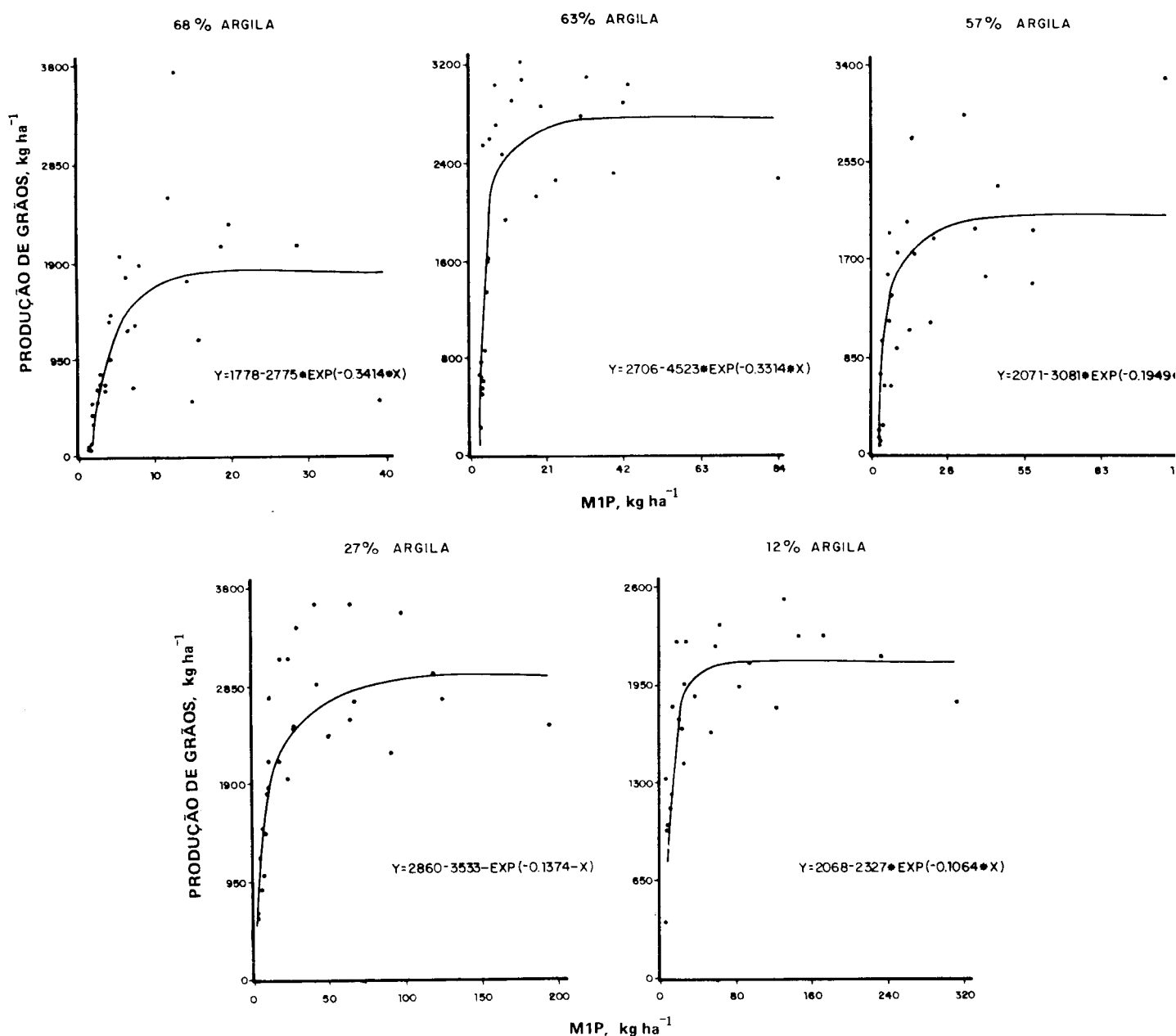


Figura 2. Produção de grãos de soja obtida em cinco solos com diferentes teores de argila em função do P-extraível pelo Mehlich-1 (M1P)

como mineral predominante da fração argila. Isso é uma evidência de que, quando se utilizar o extrator Mehlich-1, o ideal seria calibrar, separadamente, os solos gibbsíticos dos cauliniticos.

Com o objetivo de avaliar o modelo testado (equação 11), tentou-se obter as doses mais econômicas de P, utilizando-se a equação 8 para os dois solos cultivados com soja por um ano. Isso foi impossível: com dados de P extraível por um ano apenas, os valores de b_1 , b_2 e K , os quais estimam parâmetros relacionados às reações de adsorção e precipitação de fósforo, são superestimados.

Assim, tais parâmetros não podem ser usados na equação 8, pois redundariam em doses superestimadas de P.

Por isso, avaliou-se esse modelo através das quantidades de fertilizantes a serem utilizadas nos dois solos (21 e 27% de argila), cultivados com soja por um ano para atingir 90% da produção máxima. Tais doses foram obtidas através do ajuste dos dados de produção de grãos (Y) em função das doses de fósforo aplicadas nesses solos, usando-se o modelo não-linear expresso pela equação 4. As equações 12 e 13 foram obtidas, respectivamente, para os solos com 27 e 21% de argila cultivados com soja por um ano.

$$Y = 2.633 - 1.564 \exp(-0,0196 \times \text{Dose de P}) \quad (12)$$

$$Y = 3.070 - 2.503 \exp(-0,0103 \times \text{Dose de P}) \quad (13)$$

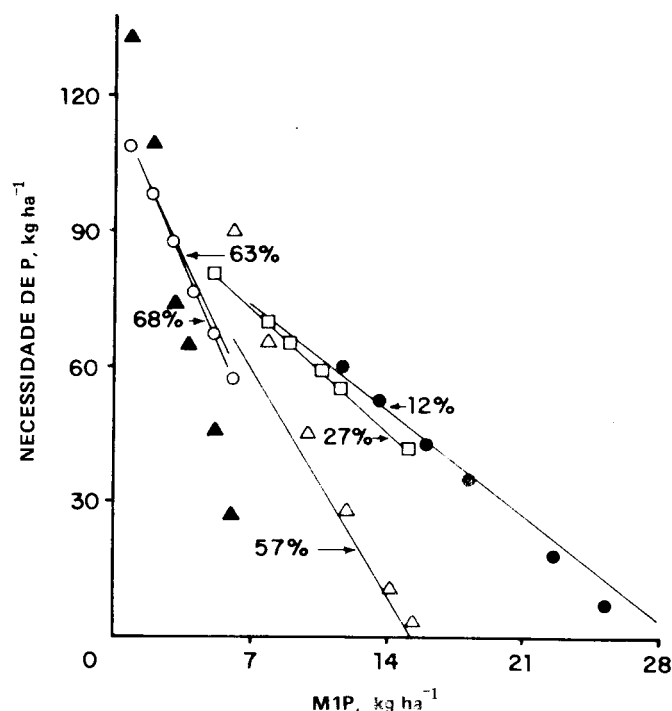


Figura 3. Necessidade de adubação fosfatada para cinco solos cultivados com soja por um período médio de seis anos, em função do P extraível pelo Mehlich-1 (M1P) e do teor de argila.

Através dessas equações, concluiu-se que haveria necessidade de aplicar 90 e 204kg ha⁻¹ de P, respectivamente, nos solos com 27 e 21% de argila, para obter 90% do rendimento de grãos de soja.

Considerando-se os teores de P em condições naturais (Quadro 1), calculou-se a quantidade de fósforo a aplicar em ambos os solos, através da equação 11. Os resultados foram aproximados, respectivamente, 92 e 96kg ha⁻¹ de P para os solos com 21 e 27% de argila. Esses dados permitem inferir que o modelo testado foi válido para o solo em que a caulinita é o mineral predominante da fração argila, embora, pela segunda vez consecutiva, tivessem sido obtidas evidências de que esse modelo, pelo menos com o extrator Mehlich-1, não funciona para solos cauliniticos e gibbsíticos. Essa conclusão pode ser mais bem visualizada pelo quadro 1, onde se vê que mais de 80% da fração argila do solo com 21% desse mineral é ocupado pela gibbsita.

Com o objetivo de testar um modelo mais preciso para os solos cauliniticos, utilizaram-se dados dos quatro experimentos de longa duração, cuja maior parte da fração argila é ocupada por este mineral, obtendo-se a seguinte equação:

$$\text{Dose de P (kg}^{-1}\text{)} = 95,5 - 3,14 (\text{P-extraível}) + 0,0046 (\% \text{ argila})^2 - 0,0012 (\text{P-extraível}) (\text{argila})^2 \quad (14)$$

O coeficiente de determinação obtido para a equação 14 foi de 0,95, superior ao da equação 11 e igual ao obtido por Lins et al. (1985). A semelhança dos coeficientes de determinação entre os dois modelos mencionados representa um indicativo de que o modelo obtido (equação 14) se ajusta às situações estudadas por Lins et al. (1985) e, também aos resultados incorporados neste trabalho. Isso permite inferir a utilidade do modelo para avaliar a situação estudada.

As doses de fósforo estimadas pela equação 14 são mostradas pelas linhas da figura 4: observa-se um ajuste razoável entre as doses calculadas pelas equações 8 e 14.

Através desta, estimou-se que a quantidade de fósforo a ser aplicada no solo com 27% de argila do MS, cultivado com soja por um ano, é de 90kg ha⁻¹ de P, igual à dose de fósforo obtida pela equação 12.

Em termos de P₂O₅, a dose de fósforo recomendada para o solo com 27% de argila equivale, aproximadamente, a 200kg ha⁻¹: esse valor será sua necessidade de fósforo para que se possa atingir e manter o teor do elemento por um ano, o mais próximo possível do teor extraível pelo Mehlich-1, que proporcione o maior retorno econômico. Considerando que Souza et al. (1987) recomendam, para os Cerrados com teor de argila entre 21 e 40%, 120kg ha⁻¹ de P₂O₅ como adubação corretiva e mais 60kg ha⁻¹ de P₂O₅ como adubação de manutenção, para uma expectativa de produção de 3,0t ha⁻¹ de soja, observa-se que as recomendações de P pelo modelo proposto pela equação 14 são consistentes com a que já vem sendo indicada para cultivar soja em solos dos Cerrados.

Os 90kg ha⁻¹ de P correspondem a uma combinação de adubação corretiva e de manutenção. Ressalva-se que, no segundo ano de cultivo deste solo, espera-se

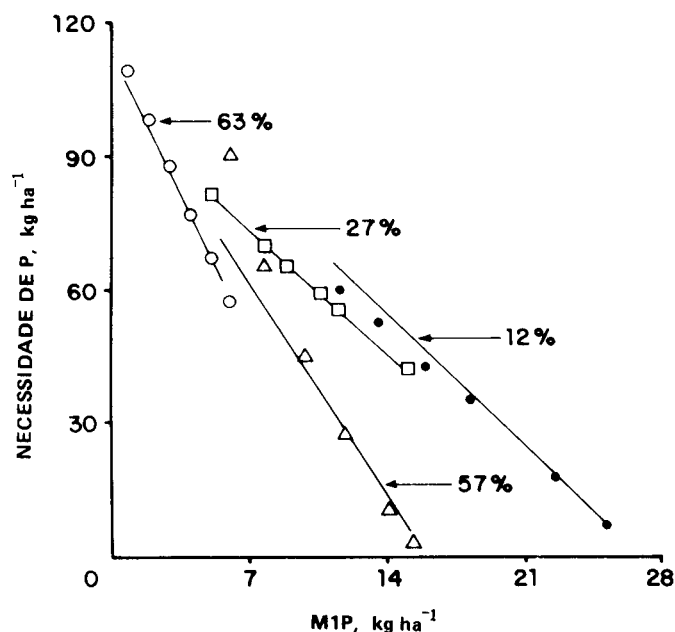


Figura 4. Necessidade de adubação fosfatada para quatro solos cultivados com soja por um período médio de seis anos, em função do P extraível pelo Mehlich-1 e do teor de argila.

que o teor de P extraível esteja próximo ao nível crítico; conseqüentemente, a necessidade de fósforo a ser estimada pela equação 14 deverá ser o equivalente às doses de adubação de manutenção, convencionalmente utilizadas para cultivar soja nos Cerrados.

As necessidades de fósforo para os sete solos estão no quadro 6. Observa-se que a quantidade de fósforo é praticamente a mesma para os dois modelos propostos, e muito semelhante àquelas obtidas pelo modelo desenvolvido por Lins et al. (1985). Portanto, qualquer um dos dois modelos (equação 11 e 14) pode ser utilizado para se recomendar adubação fosfatada para a cultura da soja nos Cerrados. Entretanto, os modelos aqui testados não conseguiram reproduzir a necessidade de fósforo para atingir 90% da produção relativa de soja em um solo gibbsítico com 21% de argila. Assim, não se recomenda sua utilização em solos com tais características. E, para solos cauliniticos, a equação 14 é mais precisa que a 11, pelo maior valor de R^2 , e precisão com que estimou a necessidade de fósforo do solo do MS, com 27% de argila, e cultivado com soja por um ano.

Quadro 6. Necessidade de fósforo para os sete solos, em função dos teores de fósforo extraível em condições naturais e argila, calculadas pelas equações 11 e 14

Equação	Necessidade de adubação fosfatada						
	Argila (%)						
	68	63	57	27	27	21	12
	kg/ha ⁻¹ de P						
11	105	85	87	69	92	96	65
14	106	87	88	67	90	93	63

CONCLUSÕES

1. Os modelos aqui propostos aplicam-se para se recomendar adubação fosfatada para a soja em solos dos Cerrados, onde a caulinita é o mineral predominante na fração argila.
2. Nos solos gibbsíticos, independentemente do teor de argila, o modelo aqui testado não deve ser utilizado, visando obter-se a dose mais econômica de fósforo.
3. Há, portanto, necessidade de calibrar separadamente os solos gibbsíticos dos cauliniticos, quando o extrator Mehlich-1 for utilizado para quantificar os teores de P extraível.

AGRADECIMENTOS

Aos Engenheiros-Agrônomos Edson Lobato, Enéas Zaborowsky Galvão, José Eurípedes da Silva, José Roberto Peres, Plínio Itamar de Souza e Wenceslau Goedert, pesquisadores do CPAC/EMBRAPA, pelas sugestões e acompanhamento nos trabalhos de campo e laboratório. Ao Engenheiro-Agrônomo Nilsso Luiz Zuffo, por conduzir, durante dois anos, os experimentos do Mato Grosso do Sul.

LITERATURA CITADA

- COPE JR., J.T. & ROUSE, R.D. Interpretation of soil test results. In: WALSH, L.M. & BETON, J.D., eds. Soil testing and plant analysis. Madison, Soil Science Society of America, 1973. p.35-54.
- COX, F.R., KAMPRATH, E.J. & McCOLLUM, R.E. A descriptive model of soil test nutrient levels following fertilization. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 45:529-532, 1981.
- COX, F.R. & LINS, I.D.G. A phosphorus soil test interpretation for corn grown on acid soils Varying in Crystalline Clay Content. Comm. Soil Science and Plant Analysis, Athens: 15:1481-1491, 1984.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
- KAMPRATH, E.J. The role of soil chemistry in the diagnose of nutrient disorders in tropical situations. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., eds. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, Austrália, CSIRO, 1978. p.313-327.
- LINS, I.D.G.; COX, F.R. & NICHOLLAIDES, J.J. III. Optimizing phosphorus fertilization rates for soybean grown on Oxisols and associated Entisols. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 49:1457-1460, 1985.
- MIRANDA, L.N. & VOLKWEISS, S.J. Relação entre a resposta da soja à adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 5:58-65, 1981.
- OZANNE, P.G. & SHAW, T.C. Advantage of recently developed phosphate sorption testes over the older extractant methods of soil phosphates. Trans. 9th. Int. Soil Sci. Cong., Adelaide, 2:273-280, 1968.
- SAS Institute, Inc. SAS User's guide: Statistics. 5 ed. SAS INSTITUTE, INC., Cary, NC, USA, 1985.
- SOUZA, D.M.G. de; MIRANDA, L.N. & LINS, I.D.G. Calibração de análise de solo para adubação fosfatada. In: Relatório Técnico Anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1982-1985. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1987. p.112-115.