

ADUBAÇÃO, CALAGEM E RENDIMENTOS SUSTENTÁVEIS DA SOJA EM UM LATOSSOLO DE SANTA CATARINA¹

EDGAR A. LANZER², ELOI E. SCHERER³ e SADI S. GRIMM⁴

RESUMO - Neste trabalho é apresentada um método para estimar efeitos residuais de adubação e calagem, diretamente sobre a função de resposta de cultivos sequenciais. O método permite fazer previsões das quantidades de adubos, requeridas para a manutenção de rendimentos sustentáveis a longo prazo. Um estudo de caso foi feito com base em dados experimentais de onze anos, com aplicações e reaplicações de P_2O_5 , K_2O e calcário dolomítico em soja. Os resultados foram satisfatórios e dão suporte ao método proposto. O trabalho é complementado com uma análise econômica em condições de equilíbrio estacionário do caso estudado.

Termos para indexação: efeito residual, fertilizantes, análise econômica.

SOYBEAN FERTILIZATION, LIMING AND SUSTAINABLE YIELDS ON A LATOSOL IN THE STATE OF SANTA CATARINA, BRAZIL

ABSTRACT - A method to estimate fertilizer residual effects directly upon the response function of sequential crops is presented. The method allows for the prediction of fertilizer quantities that are demanded to support different levels of sustained yields in the long run. A case study has been made based upon a series of eleven years of experimental results from the application and reapplication of P_2O_5 , K_2O and limestone on soybeans. The statistical fits obtained were satisfactory and support the proposed method. The study also includes an economic analysis of fertilizer applications under conditions of stationary equilibrium of the case studied.

Index terms: fertilizer, residual effect, economic analysis.

INTRODUÇÃO

O conhecimento do efeito residual dos corretivos e dos fertilizantes é indispensável para a recomendação e o uso mais econômico desses insumos. A avaliação do efeito residual é também de fundamental importância na determinação do sistema de adubação a ser adotado. Há evidências de que o efeito residual do calcário e dos fertilizantes difere de acordo com as características do solo, o clima, o sistema de cultivo utilizado e a quantidade aplicada.

Estudos anteriores no Sul do Brasil têm sistematicamente apontado a significância dos efeitos residuais da adubação fosfatada e potássica, bem como da calagem. Todavia, poucos são os trabalhos baseados em experimentos com duração superior a quatro anos ou que procurem quantificar o efeito residual. Na sucessão trigo-soja em um Oxissolo do Rio Grande do Sul, por exemplo, Fole & Grimm (1973) estimaram o efeito residual médio do P, aplicado na cultura anterior, em 40%, utilizando uma função quadrática, e em 52%, com uma função de raiz quadrada. Pimentel-Gomes (1953), utilizando uma função de Mitscherlich e dados experimentais dos EUA com batata, estimou em 76% o efeito residual do P de uma safra para outra. Abrão & Grimm (1975) observaram gradativo decréscimo no efeito residual do P durante os 35 meses em que um Oxissolo do Rio Grande do Sul foi mantido sob cultivo (trigo e alfafa), sendo este declínio mais acentuado no pri-

¹ Aceito para publicação em 24 de agosto de 1993.

² Eng. - Agr., Ph.D., UFSC/CTC/EPS, Caixa Postal 476, CEP 88049 Florianópolis, SC.

³ Eng. - Agr., Ph.D., EPAGRI/CPPP, Caixa Postal 738, CEP 89800 Chapecó, SC.

⁴ Eng. - Agr., Ph.D., EPAGRI/GRN, Caixa Postal 502, CEP 88034 Florianópolis, SC.

meiro ano. Contudo, não constatarem decréscimo no efeito residual do calcário, nem aumento no teor de Al trocável ou redução no pH do solo, decorridos 39 meses após sua aplicação. Goepfert & Mendes (1977) observaram, em outro tipo de solo do Rio Grande do Sul, que após quatro anos da aplicação do calcário houve sensível redução do pH do solo e aumento nos teores de Al trocável, o que evidencia reacidificação do solo. Contudo, Scherer et al. (1984) observaram gradativo decréscimo no efeito residual do calcário a partir do 20º mês após sua aplicação num Latossolo Roxo distrófico de Santa Catarina, cultivado com milho durante quatro anos. Por outro lado, Pimentel-Gomes (1955), baseado em um experimento com trigo de vários anos de duração e utilizando uma função de Mitscherlich, estimou em somente 42,3% o efeito residual da aplicação de cal extinta num solo da região de Ponta Grossa, Paraná.

Uma dificuldade importante na avaliação do efeito residual é a condução de experimentos de longo prazo. Outra dificuldade se refere à modelagem matemático-estatística do problema. Há, aqui, pelo menos duas possibilidades distintas:

- a. modelar a dinâmica das adubações residuais diretamente sobre observações das análises de solos (Scherer et al., 1984; Lanzer et al., 1988), e
- b. modelar os efeitos residuais nas funções de resposta do cultivo, utilizando observações da seqüência histórica das aplicações dos fertilizantes como variáveis explicativas (Lanzer, 1977; Kennedy et al., 1973; Pimentel-Gomes, 1953 e 1955; Pimentel-Gomes & Conagin, 1991).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar e avaliar um método de análise econômica de efeitos residuais, seguindo a linha de estimar tais efeitos nas funções de resposta do cultivo. Além disso, o método permite estimar as exigências de adubação e calagem para a sustentação dinâmica da produtividade.

A base de dados consiste de observações de três experimentos (com níveis de P, de K e de calcário), com duração de onze anos, utilizando-se o rendimento de soja como variável de resposta.

MATERIAL E MÉTODOS

Informação experimental utilizada

Os dados utilizados nesta pesquisa são provenientes de três experimentos, conduzidos em áreas adjacentes, no município de Campos Novos, SC. Os experimentos foram instalados em Latossolo Húmico distrófico, pertencente à unidade de mapeamento Durox, com a seguinte composição granulométrica: areia, 2%; silte, 29%, e argila, 69%. A análise química, efetuada antes da instalação dos experimentos, conforme método da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo (ROLAS) do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, apresentou os seguintes resultados: pH em água, 4,7; Ca+Mg trocáveis, 4,3 meq/100g; Al trocável, 2,4 meq/100g; P, 1,6 ppm (método Carolina do Norte); K, 125 ppm (método Carolina do Norte); matéria orgânica, 8,1%. A área estava coberta por vegetação de campo nativo antes da instalação dos experimentos.

Os três experimentos foram iniciados em 1976, com o plantio da soja, com a seqüência descrita na Tabela 1.

O experimento com calcário foi conduzido em três blocos casualizados. Os tratamentos eram constituídos por três níveis de calcário dolomítico: 0, 4,5 e 9,0 t/ha, correspondentes a 0, 50 e 100% da recomendação pelo método SMP para elevar a 6,0 o pH do solo. Após quatro anos, isto é, em 1980, as parcelas foram subdivididas em quatro subparcelas, que receberam os seguintes tratamentos: 0, 2,25, 4,50 e 6,75 t/ha de calcário (0, 1/4, 1/2 e 3/4 SMP). Em duas subparcelas adicionais foram testadas doses de 1/2 e 1 SMP, com aplicações anuais de calcário baseadas na análise de solo de cada ano. Numa terceira subparcela adicional foi avaliada a reco-

TABELA 1. Seqüência de cultivos utilizada no experimento 1976/1986, em Campos Novos, Santa Catarina.

Ano	Inverno	Verão
1976	Campo nativo	Soja
1977	Trigo	Soja
1978	Pousio	Soja
1979	Pousio	Soja
1980	Trigo	Soja
1981	Pousio	Soja
1982	Pousio	Soja
1983	Trigo	Soja
1984	Azevém	Soja
1985	Aveia-preta	Soja
1986	Trigo	Soja

mendação da ROLAS, ou seja, análises de solo e aplicação de calcário (1 SMP) a cada quatro anos.

O experimento com P foi conduzido em três blocos casualizados. Os tratamentos eram constituídos por cinco níveis de P: 0, 80, 160, 320 e 640 kg/ha de P_2O_5 . No segundo ano, as parcelas foram subdivididas em cinco subparcelas, que receberam os seguintes tratamentos: 0, 40, 80 e 120 kg/ha de P_2O_5 a lanço e 80 kg/ha de P_2O_5 no sulco. A cada semeadura de soja, tais doses eram aplicadas às mesmas subparcelas.

O experimento com K foi conduzido em três blocos casualizados. Os tratamentos eram constituídos por quatro níveis de K: 0, 80, 160 e 320 kg/ha de K_2O . Em 1980, antes do quinto plantio de soja, as parcelas foram subdivididas em quatro subparcelas, que receberam os seguintes tratamentos: 0, 40 e 80 kg/ha de K_2O a lanço e 40 kg/ha de K_2O no sulco. A partir daí, estas doses foram reaplicadas anualmente nas mesmas subparcelas, sempre na semeadura da soja.

Para corrigir a acidez do solo na área experimental, exceto no experimento com calcário, aplicaram-se 9,0 t/ha de calcário dolomítico. A adubação fosfatada, exceto no experimento com P, consistiu na aplicação de 160 kg/ha de P_2O_5 . A adubação potássica, exceto no experimento com K, consistiu na aplicação de uma dose de manutenção de 40 kg/ha de K_2O nos quatro primeiros anos e, a partir daí, 80 kg/ha de K_2O . A adubação nitrogenada foi efetuada apenas nas gramíneas, de acordo com a recomendação da ROLAS, visto que na soja foi utilizado inoculante para estimular o desenvolvimento de rizóbios fixadores de N.

Foram anotados o rendimento de grãos de soja e trigo e a produção de massa seca de azevém e de aveia-preta. No presente estudo, todavia, apenas os rendimentos de soja foram considerados, pois o objetivo dos cultivos de inverno foi proteger o solo da erosão. Assim sendo, os resultados obtidos são, evidentemente, limitados ao sistema seguido no experimento supradescrito.

Modelagem matemática

Nesta seção apresentam-se as relações básicas adotadas na composição do modelo matemático utilizado no estudo.

A primeira relação diz respeito à resposta do rendimento do cultivo da safra t. Na ausência de outros fatores limitantes, o rendimento (Y) é uma função da disponibilidade (D) do nutriente na mesma safra t:

$$Y_t = F(D_t) \quad (1)$$

A disponibilidade D_t , por seu turno, é uma função da disponibilidade existente na safra passada e da adição que se realiza na safra t através da adubação (A_t):

$$D_t = G(D_{t-1}, A_t) \quad (2)$$

Adotando-se a hipótese de que a disponibilidade do nutriente decaia a uma taxa constante ao longo do tempo, a equação (2) pode ser particularizada como:

$$D_t = P \cdot D_{t-1} + A_t \text{ onde } 0 < P < 1 \quad (3)$$

A equação (3) estabelece que a disponibilidade do nutriente para a safra t é composta por uma fração P (efeito residual) da sua disponibilidade na safra passada, mais um acréscimo fornecido pela adubação presente aplicada. Por recursão da equação (3), pode-se verificar que, para uma seqüência de safras $s = 0, 1, 2, \dots, t$:

$$D_t = P^t \cdot D_0 + \sum_{s=1}^t P^{t-s} \cdot A_s \quad (4)$$

A equação (4) explicita que, sob as hipóteses adotadas, a disponibilidade do nutriente na safra t é composta por uma fração P^t da disponibilidade original do nutriente mais um componente que depende da seqüência histórica das adubações realizadas no local. Dado que $0 < P < 1$, conclui-se que a disponibilidade original do nutriente e as adubações do passado mais distante perdem importância à medida que a seqüência de safras obtidas no local se amplia, isto é, à medida que t aumenta. Método idêntico, visando simplificar o ajustamento do modelo de resposta, foi apresentado por Pimentel-Gomes (1953).

Por outro lado, se fosse seguida uma estratégia de adubar todas as safras com uma quantidade constante A^* , então após um grande número de safras, a disponibilidade do nutriente tenderia a convergir para:

$$D^* = \lim_{t \rightarrow \infty} (P^t \cdot D_0 + \sum_{s=1}^t P^{t-s} \cdot A^*)$$

ou, desde que $0 < P < 1$:

$$D^* = (1 - P)^{-1} \cdot A^* \quad (5)$$

Observa-se, em (5), que se o efeito residual P é elevado, isto é, próximo da unidade, então a manutenção de um estoque de disponibilidade alta do nutriente irá exigir adubações em quantidades anuais relativamente pequenas. É ainda importante notar que a convergência em (5) implica também convergência em (1), isto é $A^* \rightarrow D^* \rightarrow Y^*$. Pode-se considerar Y^* como o nível de rendimento sustentável pela aplicação anual da quantidade A^* do nutriente.

Enfim, utilizando a fórmula de Taylor para aproximação de funções deriváveis, no ponto considerado, por meio de polinômios (Hamming, 1973), particulariza-se a função F da equação (1) como:

$$Y_t = \sum_{n=0}^g B_n D_t^n,$$

ou, em vista de (4):

$$Y_t = \sum_{n=0}^g B_n (P^t \cdot D_0 + \sum_{s=1}^t P^{t-s} A_s)^n \quad (6)$$

A equação (6) foi o modelo básico utilizado nesta pesquisa para avaliar os efeitos da adubação fosfatada e potássica, bem como da calagem, sobre os rendimentos da soja. Para fins de estimação, admite-se que (6) contém ainda um termo de erro aditivo com esperança matemática nula e variância constante. Para cada nutriente (P, K e calcário) devem ser estimados os seguintes parâmetros: o grau g e os coeficientes B_n ($n = 1, 2, \dots, g$) do polinômio de resposta, o nível inicial D_0 do nutriente, e seu efeito residual P . O modelo é não-linear nos parâmetros. Como um "pacote" de regressão não-linear não estava disponível, a estratégia de estimação adotada foi a de parametrizar valores P e D_0 de modo a tornar o modelo linearmente estimável. Assim, para cada par estipulado (P, D_0) foi estimado um modelo linear com base em (6), adotando-se, ao final, aquele par que apresentava a menor soma de quadrados dos resíduos. O grau do polinômio (g) era incrementado até o ponto em que a inclusão de mais um regressor, isto é, mais um grau no polinômio, tornava não-significativo ($\alpha = 0,10$) algum regressor já incluído em passo anterior.

Por outro lado, visando a amenizar os efeitos de condições de tempo diferenciadas ocorridas ao longo de onze anos de experimentação, utilizou-se o rendimento relativo como variável de resposta. O rendimento médio do tratamento z na safra t foi expresso como uma fração da média obtida nos três tratamentos de maior rendimento no mesmo experimento no mesmo ano (uma discussão das condições de validade do uso de rendimentos relativos pode ser encontrada em Lanzer et al., 1988). Uma vez obtidas as funções de resposta do rendimento relativo da soja a cada um dos elementos variáveis, foram elas combinadas numa função de resposta única por meio da Lei do Mínimo:

$$Y_t = \text{Min}(Y_{P_t}, Y_{K_t}, Y_{C_t}) \quad (7)$$

onde Y_{P_t} , Y_{K_t} e Y_{C_t} representam a estimativa da equa-

ção (6) para P, K e calcário, respectivamente. A Lei do Mínimo de von Liebig tem sido objeto de testes estatísticos com forte evidência pela sua adoção (Ackello-Ogutu et al. 1985; Grimm, 1986 e Lanzer et al., 1988). Em resumo, a expressão (7) indica que se o objetivo for uma meta qualquer de rendimentos relativos, então devem ser alcançadas disponibilidades de cada elemento, de tal modo que cada uma das respostas isoladas seja igual ou maior que a meta desejada. Por outro lado, como a disponibilidade de cada elemento depende da aplicação de adubos que custam dinheiro, não é racional propor esquemas de adubação que conduzam a desigualdades entre os níveis de resposta isolados (salvo se a disponibilidade original, no solo, de algum elemento, for muito elevada).

Em termos de análise econômica, foi feita uma avaliação de alternativas de calagem e adubação de longo prazo, isto é, avaliados custos e benefícios monetários de aplicar quantidades anuais diferenciadas A^* requeridas para sustentar níveis de produtividade diferenciados Y^* . Esta avaliação foi feita considerando-se relações de preços observadas no período 1974/86 em Santa Catarina. Para realizar a análise econômica, os rendimentos relativos foram retornados a rendimentos físicos (kg/ha), especificando-se que o nível relativo 1,00 (ou 100%) correspondia a um teto médio anual de 2.400 kg/ha de soja. O método adotado na análise econômica permite determinar a rentabilidade esperada (em termos de percentagem da receita líquida máxima) em diferentes patamares de produtividade, ao invés de identificar exclusivamente a dose que maximiza a receita líquida do produtor de soja. Esta alternativa foi adotada tendo em vista que pequenos produtores, como é freqüente em Santa Catarina, não possuem condições financeiras para aplicar a quantidade de insumos necessária à maximização da receita líquida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 resume os resultados estatísticos obtidos na análise de regressão das respostas relativas da soja ao P (P_2O_5), ao K (K_2O) e ao calcário dolomítico, levando em conta os efeitos residuais destes insumos.

De modo geral, os ajustamentos obtidos podem ser considerados satisfatórios, sobretudo levando-se em conta que as regressões foram ajustadas para conjuntos de onze anos de observações. Em todos os casos obtiveram-se melhores ajustamentos com polinômios de terceiro grau (regressão cúbica). Os coeficientes de determinação (R^2) si-

TABELA 2. Estimativa das funções de resposta em termos de rendimentos relativos de soja, em latossolo húmico distrófico.

Coeficiente	P ₂ O ₅		K ₂ O		Calcário	
	Estimativa	Teste-t	Estimativa	Teste-t	Estimativa	Teste-t
B ₀	2,35E-01	16,19	2,76E-01	12,24	1,44E-01	3,30
B ₁	3,81E-03	22,51	5,70E-03	21,15	1,81E-01	10,49
B ₂	-6,64E-06	-11,94	-1,43E-05	-14,91	-1,31E-02	-6,43
B ₃	3,90E-09	7,53	1,10E-08	11,52	3,17E-04	4,34
D ₀	100		370		4,0	
P	0,78		0,75		0,93	
R ²	0,90		0,83		0,85	
Nº Observ.	300		192		180	
Erro-padrão	0,0645		0,0722		0,0594	

Nota: O erro-padrão da estimativa refere-se a rendimentos relativos de soja.

tuaram-se entre 0,83 e 0,90, e os erros-padrão das estimativas dos rendimentos relativos por meio das regressões ficaram entre 0,059 e 0,072, isto é, entre 5,9 e 7,2% em termos de produtividades relativas. Os valores dos testes t são altos, mas não devem ser interpretados de modo estrito, por tratar-se de mínimos quadrados condicionados sobre valores exógenos dos parâmetros D₀ e P.

Do ponto de vista interpretativo, destacam-se os valores relativamente altos para os efeitos residuais P: 0,78 para o P, 0,75 para o K, e 0,93 para o calcário. Estes resultados confirmam a ocorrência de altos efeitos residuais da calagem e da adubação fosfatada e potássica, em solos argilosos do Sul do Brasil, registrada em outros estudos.

O coeficiente P = 0,78, por exemplo, sugere que, nas condições de solo do experimento, cerca de 78% do P aplicado num ano qualquer ainda estaria disponível na safra de soja seguinte. Este resultado é muito próximo do obtido por Pimentel-Gomes (1953), que estimou em 76% o efeito residual do P em cultivo de batata nos EUA. Fole & Grimm (1973), contudo, constataram efeitos residuais para o P variando de 34 a 79%, dependendo da quantidade aplicada e da função de resposta utilizada. Com base nos resultados de sete experimentos, realizados em diversos solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Lanzer et al. (1981) estimaram em 89 e 81% o efeito residual médio do P e do K, respectivamente. Na literatura

consultada não se encontraram outros estudos quantitativos do efeito residual do K, provavelmente por ser pouco comum a deficiência deste nutriente nos solos do Sul do Brasil.

O efeito residual do calcário é o mais alto de todos (93%). Este valor parece consistente, tendo em vista os resultados relatados por Abrão & Grimm (1975), Goepfert & Mendes (1977) e Scherer et al. (1984), comentados no início deste artigo. Contudo, Pimentel-Gomes (1955), baseado em experimento com trigo realizado no Paraná, estimou em apenas 42,3% o efeito residual da aplicação de cal extinta.

Os resultados da Tabela 2 permitem calcular, seguindo os métodos apresentados na seção anterior, as seguintes funções de rendimentos sustentáveis:

$$\underline{Y}_p^* = 0,235 + (1,73E-02).Ap^* - (1,37E-04).Ap^{*2} + (3,66E-07).Ap^{*3} \quad (8)$$

$$\underline{Y}_k^* = 0,276 + (2,28E-02).Ak^* - (2,29E-04).Ak^{*2} + (7,04E-07).Ak^{*3} \quad (9)$$

$$\underline{Y}_c^* = 0,144 + 2,59.Ac^* - 2,673.Ac^{*2} + 0,9242.Ac^{*3} \quad (10)$$

onde

\underline{Y}_x^* é o rendimento relativo da soja que pode ser sustentado por aplicações de Ax* unidades por hectare por ano do elemento x [x = p, k, c; onde p

é medido em kg de P_2O_5 /ha/ano; k é medido em kg de K_2O /ha/ano e c é medido em t de calcário dolomítico (PRNT = 100%)/ha/ano].

A partir das equações (8), (9) e (10) é possível estimar as doses anualmente exigidas de cada insumo para sustentar diferentes metas de produtividade relativa (Tabela 3). É importante ressaltar que as estimativas da Tabela 3 são referentes a situações de equilíbrio estacionário, alcançável a longo prazo. Assim, não está implícito que estas metas de produção relativa sustentável sejam alcançadas imediatamente após a primeira aplicação das quantidades de insumos relacionadas na Tabela 3. Este é um processo dinâmico, e a resposta do cultivo, em qualquer safra, depende do nível residual da fertilidade inicial e das adubações passadas, além da adubação feita na própria safra [conforme equações (1) e (4) da seção anterior; este ponto será abordado novamente mais adiante].

Certamente as equações estimadas permitem prever os efeitos cumulativos das adições de insumos ao longo do tempo, mas interessa agora avaliar a economicidade de metas de rendimento sustentável alternativas em condições de equilíbrio estacionário. Neste sentido, foi calculada a margem financeira entre a receita de soja por hectare e as despesas associadas com a adubação fosfatada e potássica e a calagem por hectare para as alternativas listadas na Tabela 3 sob preços médios anuais de 1974 a 1986, em Santa Catarina. Admitiu-se, para cada ano, um teto de 2.400 kg/ha de soja (assim, um rendimento relativo unitário equivale a

2.400 kg/ha de soja). Para melhor visualização dos resultados, procurou-se eliminar o efeito da inflação, fazendo a margem financeira mais alta de cada ano como 100 e computando as demais do ano relativas a esse índice de referência (Tabela 4).

Da Tabela 4 infere-se que a meta de rendimento sustentável mais freqüentemente indicada como mais rentável é a de 0,95 (ou 95% do teto de rendimentos máximos). Todavia, a meta de 0,90 apresenta um desempenho econômico praticamente tão bom quanto aquela, e, possivelmente, com risco financeiro mais baixo (vide, por exemplo, o ano de 1974). As exigências para sustentação destas metas se situam entre 70 e 90 kg de P_2O_5 /ha/ano, de 45 a 55 kg de K_2O /ha/ano e de 0,52 a 0,65 t de calcário dolomítico (PRNT = 100%)/ha/ano (conforme Tabela 3).

Em relação a estudos anteriores, particularmente os de Lanzer et al. (1988) e de Scherer et al. (1984), os resultados agora obtidos são semelhantes em termos de adubação potássica, mas sugere

TABELA 4. Índices das margens financeiras anuais entre a receita de soja e o custo de P_2O_5 , de K_2O e de calcário dolomítico (PRNT=100%) para diferentes metas de rendimento sustentável sob preços vigentes entre 1974 e 1986 e admitindo um teto de produção de 2.400 kg/ha.

TABELA 3. Estimativas de aplicações anuais de P_2O_5 , K_2O e calcário dolomítico exigidos para a sustentação de diferentes metas de rendimento relativo de soja, em latossolo húmico distrófico do Município de Campos Novos, SC.

Meta de rendimento sustentável Y*	Exigências anuais		
	P_2O_5 -kg/ha	K_2O -kg/ha	Calcário-t/ha
0,65 (ou 65%)	30	20	0,27
0,70 (ou 70%)	36	24	0,30
0,75 (ou 75%)	42	28	0,34
0,80 (ou 80%)	49	32	0,39
0,85 (ou 85%)	58	38	0,45
0,90 (ou 90%)	70	45	0,52
0,95 (ou 95%)	90	55	0,65

Ano	Metas de rendimento relativo sustentável (%)					
	70	75	80	85	90	95
1974	92	96	99	100	99	93
1975	88	92	96	99	100	98
1976	86	91	95	98	100	99
1977	80	85	90	94	98	100
1978	82	86	91	95	98	100
1979	81	86	91	95	98	100
1980	87	91	95	98	100	99
1981	87	91	95	98	100	99
1982	84	89	93	97	99	100
1983	83	88	92	96	99	100
1984	81	86	91	95	98	100
1985	84	89	93	97	99	100
1986	83	88	92	96	99	100
Média	84,4	88,8	93,3	96,8	99,0	99,1

rem doses anuais de P mais elevadas e de (manutenção de) calcário consideravelmente menores.

As diferenças no caso do P podem ser atribuídas ao fato de que o solo destes experimentos tem maior capacidade de fixação deste elemento do que a média dos incluídos em Lanzer et al. (1988). Já no caso do calcário, a hipótese que se apresenta é a de que o seu efeito residual, medido pelo coeficiente P, não seja de fato uma constante, e sim uma variável que aumenta na medida em que o próprio pH do solo se eleva. Nestas circunstâncias, estimativas médias de efeito residual obtidas em prazos de observação mais longos e que incluam reaplicações de calcário tenderiam a ser superiores a estimativas médias obtidas em prazos menores e sem reaplicações [o presente estudo foi feito sobre onze anos de observações, enquanto que Scherer et al. (1984) utilizaram uma base de seis anos].

Por fim, foram feitas algumas simulações com as equações estimadas no sentido de avaliar a velocidade de convergência das respostas do rendimento sobre determinada meta de rendimento sustentável. No caso de um solo em condições iniciais de extrema depauperação ($D_0=0$, para P, K e calcário), e supondo-se que ano a ano fossem aplicadas apenas as doses necessárias para sustentar uma meta de rendimento de 90%, observou-se que tal meta seria praticamente alcançada em cerca de dez a doze anos, em termos das respostas ao P e ao K isoladamente. Todavia, a resposta ao calcário demoraria em torno de 30 anos para convergir para a meta estipulada. Pela Lei do Mínimo, isto significa que o rendimento efetivo seria, durante este período, limitado pela resposta do calcário. Estas observações não foram sensivelmente modificadas mesmo quando se admitiu $D_0=4$ para calcário, isto é, uma disponibilidade inicial no solo equivalente à aplicação de 4 t/ha de calcário.

Inferese, portanto, que uma dose inicial "alta" de calcário é estratégica para permitir elevação de rendimentos em horizontes mais curtos e prioritária em condições de limitação de recursos financeiros para aquisição de adubos e corretivos. É ainda possível, para o caso do solo do experimento em questão, especificar melhor o que se entende por uma dose inicial "alta". Para tanto, recorre-se à equação (5), levando-se em conta que a

dose de sustentação para uma meta de 95% do rendimento é de 0,65 t de calcário por hectare por ano e que o efeito residual do calcário foi estimado em $P = 0,93$. Conseqüentemente, o estoque-meta no solo fica $D^*=9,28$ t/ha. Ora, como o estoque inicial foi estimado em 4 t/ha, haveria a necessidade de acrescentar 5,28 t/ha como dose inicial e manter tal estoque com doses anuais de 0,65 t/ha. A isto se contrapõe a atual recomendação, para as condições iniciais do solo do experimento, de uma dose inicial de 9 t de calcário/ha para elevar o pH (SMP) até 6,0 e revisar quinzenalmente a necessidade de correção da acidez, com o mesmo objetivo.

Os diferenciais de custos das diferentes estratégias sugerem que o assunto seja objeto de pesquisas adicionais, pois os pequenos produtores raramente dispõem do capital financeiro suficiente para adotar integralmente as atuais recomendações da ROLAS. Uma estratégia intermediária, com aplicação inicial de 6 a 7 t de calcário/ha e reaplicações a cada dois anos, poderia também ser competitiva.

A adoção de tecnologia de modo gradual aproveitando as melhores perspectivas de retorno ao capital escasso é uma racionalidade econômica já verificada por Byerlee & Polanco (1986) para pequenos agricultores.

CONCLUSÕES

1. O modelo analítico utilizado neste estudo para avaliar efeitos residuais de fertilizantes, diretamente nas funções de resposta do cultivo, mostrou aderência estatística satisfatória aos dados obtidos nos experimentos de campo.

2. Comprovaram-se resultados de estudos anteriores que indicavam efeitos residuais elevados para aplicações de P, K e calcário dolomítico nos solos argilosos do Sul do Brasil.

3. A análise econômica indicou que metas sustentáveis de rendimentos situadas entre 90 e 95% do teto máximo estão associadas a um objetivo de maximização de margens financeiras entre as receitas da soja e o custo dos insumos a longo prazo.

4. O estudo sugere também que a atual estratégia de correção da acidez do solo, adotada pela

ROLAS, seja reestudada, no sentido de diminuição da dose inicial e da inclusão de recomendação de doses anuais de calcário dolomítico para "manutenção" do pH.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, J.J.R.; GRIMM, S.S. Avaliações do efeito residual da calagem e da adubação fosfatada num oxissolo, durante três anos de cultivo. *Agronomia Sulriograndense*, v.11, n.1, p.105-127, 1975.
- ACKELLO-OGUTU, C.; PARIS, Q.; WILLIAMS, W. Testing a von Liebig crop response function against polynomial specifications. *American Journal of Agricultural Economics*, v.67, p.873-880, 1985.
- BYERLEE, D.; POLANCO, E. Farmer's stepwise adoption of technological packages. *American Journal of Agricultural Economics*, v.68, n.3, p.519-527, 1986.
- FOLE, D.A.; GRIMM, S.S. Avaliação do efeito residual do fósforo por meio de métodos de extração e modelos matemáticos no oxissolo Passo Fundo. *Agronomia Sulriograndense*, v.9, n.2, p.205-221, 1973.
- GOEPFERT, C.F.; MENDES, I.O. Efeito residual da adubação fosfatada da calagem e de elementos menores, sobre a cultura do milho (*Zea mays*), em solo Pinheiro Machado. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 21, 1977, Porto Alegre. Ata... Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agrônomicas, Secretaria da Agricultura, 1977. p.181-186.
- GRIMM, S.S. **Estimation of water and nitrogen response functions: a factor non-substitution model approach**. Davis: University of California, 1986. Ph.D. Thesis.
- HAMMING, R.W. **Numerical methods for scientists and engineers**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1973.
- KENNEDY, J.O.; WHAN, I.; JACKSON, R.; DILLON, J.L. Optimal fertilizer carry-over and crop recycling policies for a tropical grain crop. *Australian Journal of Agricultural Economics*, v.17, p.104-113, 1973.
- LANZER, E.A. Um modelo de quantificação do efeito residual da calagem para análise econômica. *Revista de Economia Rural*, v.15, p.1-16, 1977.
- LANZER, E.A.; PARIS, Q.; WILLIAMS, W.A. A dynamic model for technical and economic analysis of fertilizer recommendations. *Agronomy Journal*, v.73, p.733-737, 1981.
- LANZER, E.A.; PARIS, Q.; WILLIAMS, W.A. **A non-substitution dynamic model for optimal fertilizer recommendations**. Berkeley: University of California, 1988. (Giannini Foundation Monograph, 41).
- PIMENTEL-GOMES, F. The use of Mitscherlich's regression law in the analysis of experiments with fertilizers. *Biometrics*, v.9, p.498-516, 1953.
- PIMENTEL-GOMES, F. A estimação do efeito residual de fertilizantes por meio da Lei de Mitscherlich. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, v.12, p.69-75, 1955.
- PIMENTEL-GOMES, F.; CONAGIN, A. Experimentos de adubação: planejamento e análise estatística. In: EMBRAPA. **Métodos de Pesquisa em Fertilidade do Solo**. Brasília: EMBRAPA, 1991. P.103-188.
- SCHERER, E.E.; LANZER, E.A.; ECHEVERRIA, L.C.R.; BARTZ, H.R. **Dinâmica da correção da acidez do solo e seus efeitos na produção do milho**. [S.l.]: EMPASC, 1984. (Boletim Técnico, 27).