

EFICÊNCIA E INTERAÇÕES ENTRE NUTRIENTES NA PRODUÇÃO DE GRÃOS DE ALGODÃO, FEIJÃO, SOJA E TRIGO

Tadeu Silva de Oliveira¹, Rogério de Paula Lana², Geicimara Guimarães³, José Gilson Louzada Regadas Filho⁴

RESUMO – Objetivou-se explicar as possíveis interações entre nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) na eficiência de uso na produção de grãos de algodão, feijão, soja e trigo. Utilizou-se o modelo de Lineweaver-Burk para se obter as constantes cinéticas k_{max} (desempenho máximo teórico) e k_s (quantidade de nutriente para atingir metade do desempenho máximo teórico). Avaliou-se o efeito de um segundo fator (calcário, nitrogênio ou fósforo) na mudança de k_{max} e k_s do primeiro nutriente sob avaliação. O segundo nutriente aumentou a eficiência de uso do primeiro nutriente, ao aumentar o k_{max} sem ou com aumento do k_s . Em ambas as situações, a mais alta eficiência de uso de nutrientes acontece em baixo nível de fertilização. Embora a produtividade máxima de grãos seja sempre desejável, há elevada demanda de nutrientes, mas a eficiência de uso de nutrientes diminui drasticamente à medida que aumenta o nível de nutrientes, especialmente quando k_s é baixo. Neste contexto, elevados níveis de fertilizantes na agricultura levam à exaustão de recursos naturais não renováveis e à poluição ambiental.

Palavras-chave: Fertilizantes, Lineweaver-Burk, Michaelis-Menten, modelagem.

EFFICIENCY AND INTERACTION AMONG NUTRIENTS IN CROP PRODUCTION IN COTTON, BEANS, SOYBEAN AND WHEAT

ABSTRACT – This research aimed to evaluate saturation kinetic models of plant responses to fertilization, and to understand possible interactions among nutrients in the efficiency of nutrient use in crop production. Data of soybean (*Glycine max*), wheat (*Triticum aestivum*), cotton (*Gossipium hirsutum*), and bean (*Phaseolus vulgaris*) responses to nitrogen, phosphorus or potassium fertilization showed hyperbolic curves and followed a Michaelis-Menten relationship. The data were evaluated by Lineweaver-Burk to obtaining the kinetic constants k_{max} (theoretical maximum performance) and k_s (amount of nutrient to reach half theoretical maximum performance). The effect of a second factor (limestone, nitrogen or phosphorus) in changing the k_{max} and k_s of the first nutrient under evaluation. A second nutrient increases the efficiency of the first nutrient under evaluation, by increasing k_{max} without or with increase in k_s . In both situations, the highest efficiency of use of nutrient happens at low-level fertilization. Although maximum crop productivity is always desirable, it demands elevated levels of nutrients, but the efficiency of nutrient use decreases drastically as the level of the nutrient increases, especially when k_s is low. In addition, elevated levels of fertilizers in agriculture leads to exhaustion of nonrenewable natural resources and environmental pollution.

Keywords: Fertilizers, Lineweaver-Burk, Michaelis-Menten, modeling.

¹ Doutorando em Zootecnia, Departamento de Zootecnia/UFV, bolsista CNPq, e-mail: tadeusilva@zootecnista.com.br

² Professor do Departamento de Zootecnia/UFV, bolsista CNPq

³ Graduanda em Economia Rural, Departamento de Economia Rural

⁴ Doutorando em Zootecnia, Departamento de Zootecnia/UFV, bolsista CAPES



1. INTRODUÇÃO

Fertilizantes são utilizados para aumentar a produção de grãos em sistemas agrícolas intensivos nas regiões temperadas. Nos trópicos, os fertilizantes têm sido menos utilizados devido às restrições econômicas (Maroko et al., 1999).

As plantas apresentam respostas curvilíneas aos nutrientes e, de acordo com a lei dos rendimentos decrescentes (Mitscherlich, 1909), os riscos econômicos aumentam pelo acréscimo da fertilização para atingir altos desempenhos das plantas, tornando o sistema produtivo mais oneroso. Porém, o rendimento decrescente é mais evidente em solos pobres, em que a resposta produtiva é maior em baixo nível de fertilização, levando à redução no custo de produção (Yadav, 2003).

A resposta curvilínea no desempenho de plantas e animais ao suprimento de nutrientes foi associada aos modelos de saturação cinética de Michaelis-Menten, e o método de transformação de dados de Lineweaver-Burk foi utilizado para se obter as constantes cinéticas do modelo de Michaelis-Menten, k_{max} e k_s (Lana, 2007; Lana et al., 2005). O modelo de Michaelis-Menten permite calcular a eficiência de utilização de nutrientes, em kg de grãos/kg de fertilizante, que decresce em função do aumento do suprimento de nutrientes. Este procedimento está de acordo com a lei dos rendimentos decrescentes, e permite o uso racional de fertilizantes, com grande implicação na economia e sustentabilidade ambiental da agricultura mundial.

O aumento na produtividade é objetivo da agricultura, mas a excessiva utilização dos recursos naturais não renováveis e a poluição ambiental são consequências negativas.

Existem diferentes métodos de recomendação de adubação, há métodos que se baseiam no nível inicial de nutrientes no solo, resíduo mineral no solo na pós-colheita, medidas de disponibilidade mineral das plantas e respostas das plantas aos nutrientes (Mombiola et al., 1981; Makowski et al., 1999, 2001; Reid, 2002).

A maior parte das recomendações de adubação se baseia no método de cálculos do requerimento de nutrientes da cultura e da contribuição mineral do solo, visando corrigir as deficiências. Este método busca recomendar a menor dose de nutrientes para a máxima produção. Entretanto, o método não contempla a relação custo dos nutrientes e preço dos grãos e não permite

a comparação entre diferentes dosagens (Makowski et al., 1999).

O modelo de Michaelis-Menten tem um grande potencial para ser usado na recomendação de uso de nutrientes na agricultura (Lana, 2007), ao considerar a eficiência de uso dos nutrientes e a lei dos rendimentos decrescentes de Mitscherlich (1909). Este modelo pode agregar importantes conceitos como as respostas aos diferentes níveis de nutrientes, a relação benefício-custo, a eficiência de uso de nutrientes, a racionalidade de uso de recursos naturais não renováveis e a conscientização sobre a poluição ambiental.

Objetivou-se avaliar os modelos de saturação cinética nas respostas das plantas à fertilização e as possíveis interações entre nutrientes no desempenho das plantas e na eficiência de uso de nutrientes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Departamento de Zootecnia da Universidade Federal de Viçosa. Utilizaram-se dados de sete experimentos para avaliar as respostas das plantas à fertilização.

Os três experimentos de soja fertilizada com fósforo consistiram de níveis de 0, 100, 200 e 300 kg/ha de P_2O_5 , sem ou com 7.000 kg/ha de calcário (Malavolta, 1989); o segundo experimento consistiu de 0, 100, 200, 300 e 400 kg/ha de P_2O_5 , sem ou com 6.000 kg/ha de calcário (Oliveira et al., 1982); e o terceiro de 0, 80, 160, 320 e 640 kg/ha de P_2O_5 , sem ou com 7.000 kg/ha de calcário (Oliveira et al., 1982).

No experimento de trigo fertilizado com fósforo foram utilizados os níveis de 60, 230 e 400 kg/ha de P_2O_5 , sem ou com 5.000 kg/ha de calcário (Malavolta, 1989).

O experimento de algodão fertilizado com potássio consistiu de níveis de 0, 50, 100 e 150 kg/ha de K_2O , sem ou com 6.000 kg/ha de calcário (Malavolta, 1989).

Nos experimentos com produção de feijão, o primeiro consistiu de três níveis de nitrogênio (0, 30 e 60 kg/ha de N) por quatro níveis de fósforo (0, 40, 80 e 100 kg/ha de P_2O_5) (Oliveira et al., 1982). O segundo também consistiu de três níveis de nitrogênio (0, 50 e 120 kg/ha de N) por quatro níveis de fósforo (0, 50, 150 e 250 kg/ha de P_2O_5) (malavolta, 1989).

Os dados foram analisados por regressões lineares da recíproca das respostas das plantas em função da recíproca do suprimento de nutrientes, esta metodologia conhecida como transformação de dados de Lineweaver-Burk (Lineweaver & Burk, 1934; Champe & Harvey, 1994), foi desenvolvida de acordo com Lana et al. (2005) como segue:

$$1/Y = a + b * (1/X)$$

onde:

Y = respostas das plantas (rendimento de grãos, x 1.000 kg/ha),

a = intercepto,

b = coeficiente de regressão linear,

X = quantidade de nutriente (kg/ha/ano).

A máxima produção teórica de grãos (k_{max}) foi obtida pela recíproca do intercepto ($1/a$). A quantidade de nutriente (X) necessária para atingir metade da resposta máxima teórica (k_s) foi obtida do modelo apresentado acima, substituindo-se Y por $1/a \times 50(\%) \times 0,01$ ou dividindo-se o coeficiente da regressão linear pelo intercepto (b/a).

A eficiência de uso de nutrientes foi calculada dividindo-se o acréscimo na produção de grãos ($Y_2 - Y_1$) pelo aumento nas doses de fertilização ($X_2 - X_1$), de um nível específico de fertilizante em relação ao nível anterior.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações das respostas biológicas aos nutrientes na ausência ou presença de um segundo nutriente limitante são apresentadas na Figura 1 e Tabela 1.

Espera-se mudança no rendimento máximo (k_{max}) e k_s do primeiro nutriente limitante (aumento, sem efeito ou decréscimo). A Figura 1A ilustra quatro tipos de respostas na produção, e modelos de dupla-recíproca são apresentados na Tabela 1 e Figura 1B, demonstrando a combinação de dois valores de k_{max} por dois de k_s .

Os melhores efeitos que um segundo nutriente limitante pode causar são o aumento do k_{max} , decréscimo do k_s , ou ambas as mudanças. Entretanto, aumento no k_{max} pelo aumento na produtividade com um segundo nutriente aumenta a eficiência de uso do primeiro nutriente limitante (Figura 1C), mas este benefício decresce acentuadamente com o aumento da quantidade

do primeiro nutriente limitante, especialmente quando k_s é baixo.

A resposta das plantas à adubação depende da fertilidade do solo (Malavolta, 1989; Oliveira et al., 1982) em que altas respostas ocorrem quando a fertilidade do solo é baixa (Figura 2A) e em baixo nível de fertilização, que é o principal fator que acarreta a eficiência de uso dos fertilizantes (Figura 2B).

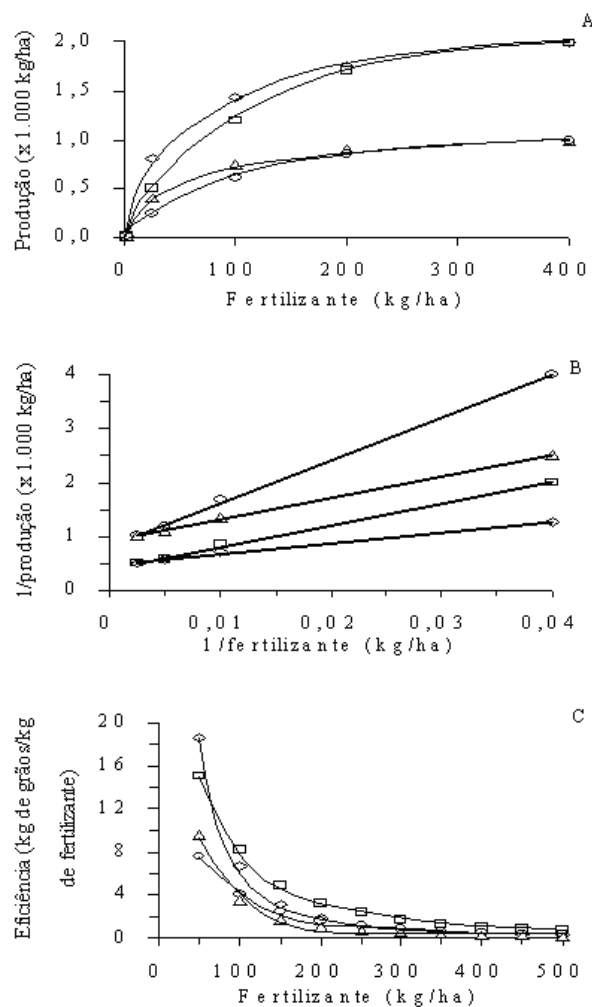


Figura 1. Respostas biológicas aos nutrientes em função de um segundo nutriente limitante (A) - controle (○), decréscimo no k_s (△), aumento no k_{max} (□) e decréscimo no k_s e aumento no k_{max} (◇); recíproca da produção em função da recíproca do nível de fertilizante - plotagem de Lineweaver-Burk (B); e efeito de um segundo nutriente limitante na eficiência de uso do primeiro (C).

Equações de transformação de dados de Lineweaver-Burk foram usadas para explicar o efeito da fertilização e o efeito de um segundo fator no rendimento, k_s , k_{max} e eficiência de uso de fertilizantes (Tabelas 2, 3 e 4). As equações (Tabelas 2 e 3) predizem bem os dados observados como visto na Figura 3, para os dados totais agrupados de produção de grãos. O nível zero

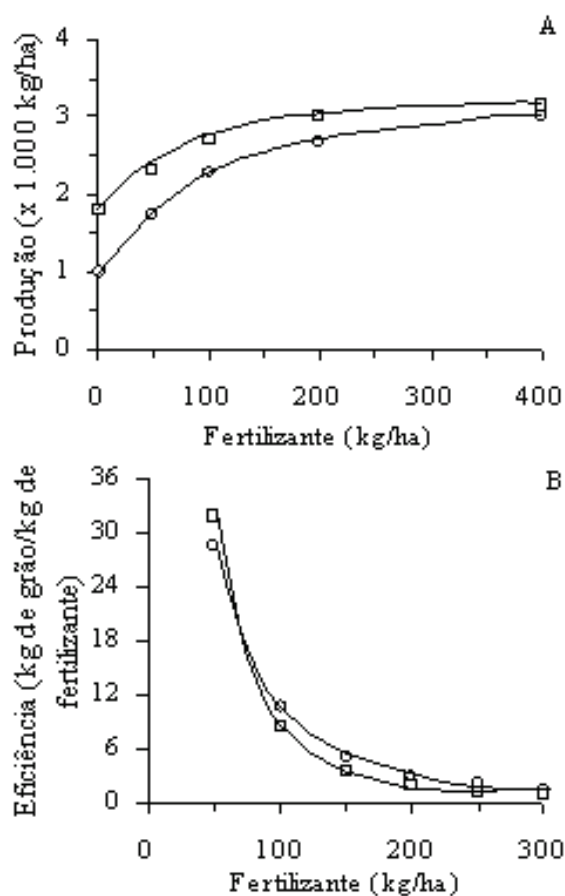


Figura 2. Resposta da planta ao fertilizante em baixa (O) e alta (□) fertilidade do solo (A); e efeito da fertilidade do solo na eficiência de uso de fertilizante (B).

de fertilização foi alterado para um número próximo de zero, ou do contrário o modelo não estimaria a produtividade.

Quando calcário foi o segundo fator, houve mudança de k_s e k_{max} em 34 e 85%; -75 e -10%; e 33 e 22% para soja fertilizada com P_2O_5 (Tabela 2). Calcário como um segundo fator mudou k_s e k_{max} , respectivamente, em -55 e -12% para trigo fertilizado com P_2O_5 , e em 9 e 87% para algodão fertilizado com K_2O .

Como visto acima, aumento ou decréscimo em k_{max} está associado com o mesmo efeito em k_s , mas aumento no k_{max} e aumento exagerado em k_s não é desejável, pois demanda maior quantidade de fertilizante para atingir o platô. Em outras palavras, os maiores valores de k_s apresentam maiores respostas ao uso de fertilizantes em alto nível de fertilização, mas isto pode não ser vantajoso pelo aumento no custo.

No caso da soja (Tabela 2), considerando US\$1,208/kg de P_2O_5 e US\$0,178/kg de soja, é necessário 6,8 kg de soja para pagar 1 kg de fertilizante. Portanto, é viável usar de 50 a 100 kg de P_2O_5 na ausência de calcário e 100 kg de P_2O_5 na presença de calcário. Acima de 150 kg de P_2O_5 , embora em alguns casos houve ainda reposta ao fertilizante, especialmente em altos valores de k_s , a resposta não é viável economicamente.

Na produção de feijão (Tabela 3), o segundo fator (P_2O_5) aumentou o k_{max} do nitrogênio de 0,1-0,5 para 1,0-1,6 x 1.000 kg/ha de feijão, mas também aumentou o k_s (1 para 13 e 17 para 29 kg/ha de nitrogênio). Quando o segundo fator foi o nitrogênio, houve aumento o k_{max} do P_2O_5 de 0,7-0,8 para 1,5 x 1.000 kg/ha de feijão, e também no k_s (5 para 15 e 136 para 199 kg/ha de P_2O_5). No segundo caso, os altos valores de k_s para P_2O_5 proporcionaram pouca melhoria na eficiência de uso deste fertilizante em baixo nível de adubação (Tabela 4). A produção extra neste caso pode não ser suficiente para pagar a quantidade adicional de fertilizantes.

Tabela 1 - Constantes de regressão linear da recíproca da produção de grãos (x1.000 kg/ha) em função da recíproca da quantidade de fertilizantes (kg/ha/ano) em situações hipotéticas de altos ou baixos valores de constantes de saturação k_s (kg de fertilizante/ha) e k_{max} (x1.000 kg/ha)

Equação	Símbolo	Intercepto (a)	Coefficiente (b)	r^2	k_s	k_{max}
1	○	0,8163	79,789	1,00	98	1,2
2	△	0,9195	39,591	1,00	43	1,1
3	□	0,4082	39,894	1,00	98	2,4
4	◇	0,4768	19,483	1,00	41	2,1

Embora o uso da cinética de saturação para explicar as respostas dos seres vivos aos nutrientes não seja muito utilizado (Morgan et al., 1975), o modelo de Michaelis-Menten explica bem a relação curvilínea das respostas das plantas e animais aos nutrientes (Lana et al., 2005).

O modelo de Michaelis-Menten é o seguinte: $k = (k_{max} * S)/(k_s + S)$, onde k é a taxa específica de crescimento (produção de grãos em kg/ha/ano), k_{max} é a taxa de crescimento máxima teórica, S é a concentração de substrato (por exemplo, fertilizante em kg/ha/ano) e k_s é a quantidade de substrato necessária para atingir metade da taxa de crescimento máximo teórica.

O uso da equação de regressão linear de duplo-recíproca ou transformação de dados de Lineweaver-Burk (Lineweaver & Burk, 1934) permite obter as constantes cinéticas do modelo de Michaelis-Menten, k_s e k_{max} , e permite ainda calcular a quantidade de um nutriente específico necessário para atingir outras

porcentagens da resposta máxima teórica, a eficiência de uso de nutrientes e a relação benefício-custo considerando a lei dos rendimentos decrescentes (Lana et al., 2005; Lana et al., 2007, Figura 1C; Tabelas 2 e 4).

As equações apresentadas nas Tabelas 2 e 3 foram eficientes em estimar os dados observados, como verificado na Figura 3 para os dados totais agrupados de produção de grãos. Para aumentar a precisão ao usar o modelo de Lineweaver-Burk, tratamentos com níveis crescentes de nutrientes deveriam ser usados em quantidades dobradas, e os níveis mais baixos deveriam ter mais repetições, porque eles têm maior influência na inclinação na equação de regressão linear de duplo-recíproca (Figura 1B). Por outro lado, tratamentos com altos níveis (excesso) de nutrientes são necessários para atingir o platô de resposta e, então, para obter intercepto confiável na equação de regressão linear de duplo-recíproca (Figura 1B).

Tabela 2 - Mudanças nas constantes de regressão linear da recíproca da produção de grãos (x1.000 kg/ha) em função da recíproca da quantidade de fertilizante (kg/ha/ano), pelo segundo fator, e a respectiva eficiência de uso de fertilizantes (kg de grãos/kg de fertilizante)

Produto	Fertilizante (kg/ha/ano)	Segundo fator ¹	Intercepto(a)	Coefficiente(b)	r ²	k _s ²	k _{max} ³	Fonte de dados ⁴
Soja	P ₂ O ₅	-	0,7536	57,766	1,00	77	1,3	1
		+	0,4096	42,198	1,00	103	2,4	1
Soja	P ₂ O ₅	-	0,3502	30,524	0,98	87	2,9	2
		+	0,3801	8,2987	0,99	22	2,6	2
Soja	P ₂ O ₅	-	0,3103	3,6726	0,68	12	3,2	2
		+	0,2535	3,9962	0,53	16	3,9	2
Trigo	P ₂ O ₅	-	0,4169	174,48	1,00	419	2,4	1
		+	0,4781	91,0	1,00	190	2,1	1
Algodão	K ₂ O	-	0,622	4,6865	0,91	7,5	1,6	1
		+	0,3284	2,7052	0,97	8,2	3,0	1
	Fertilizante (kg/ha)		Eficiência de uso de fertilizantes (kg de grãos/kg de fertilizante) ⁵					
			50 ²	100	150	200	250	300
Soja	P ₂ O ₅ - Calc ¹	-	10,0	4,5	2,5	1,6	1,1	0,8
		+	16,0	8,1	4,9	3,3	2,4	1,8
Soja	P ₂ O ₅ - Calc	-	15,5	9,7	5,6	3,7	2,6	1,9
		+	15,4	6,6	2,7	1,5	1,0	0,7
Soja	P ₂ O ₅ - Calc	-	28,0	5,5	2,1	1,1	0,7	0,5
		+	37,0	8,2	3,2	1,7	1,1	0,7
Trigo	P ₂ O ₅ - Calc	-	5,0	4,1	3,4	2,9	2,4	2,1
		+	8,3	5,7	4,0	3,0	2,3	1,8
Algodão	K ₂ O - Calc	-	10,5	2,0	0,7	0,4	0,2	0,2
		+	20,8	4,0	1,5	0,8	0,5	0,3

¹ Calcário: sem (-) ou com (+) 4.000 a 7.000 kg/ha; ² Kg de fertilizante/ha - P₂O₅ ou K₂O; ³ x1.000 kg/ha de grãos; ⁴ 1 = Malavolta (1989), p.61, 275 e 283; 2 = Oliveira et al. (1982), p.36; ⁵ Considerando US\$1,208/kg de P₂O₅ e US\$0,178/kg de soja, é necessário 6,8 kg de soja para pagar um kg de fertilizante. Eficiência menor que 6,8 kg de soja/kg de P₂O₅ não é viável. Estes cálculos podem ser usados para escolher o nível de fertilização.



Tabela 3 - Mudanças nas constantes de regressão linear da recíproca da produção de feijão (x1.000 kg/ha) em função da recíproca da quantidade de fertilizante (kg/ha/ano), por um segundo fator

Fertilizante(kg/ha/ano)	Segundofator	Intercepto(a)	Coefficiente(b)	r ²	k _s ¹	k _{max} ²	Fonte dedados ³	
N	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	2,044	2,794	0,82	1	0,5	1
		40	0,782	8,516	1,00	11	1,3	
		80	0,710	6,718	0,99	9	1,4	
		100	0,630	8,205	1,00	13	1,6	
N	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	10,764	183,36	0,23	17	0,1	2
		50	2,5229	46,235	0,78	18	0,4	
		150	1,3364	15,623	0,99	12	0,7	
		250	0,9539	28,056	0,98	29	1,0	
P ₂ O ₅	N (kg/ha)	0	1,3812	6,7411	0,98	5	0,7	1
		30	0,8181	8,8241	1,00	11	1,2	
		60	0,6842	10,186	1,00	15	1,5	
P ₂ O ₅	N (kg/ha)	0	1,3257	180,38	0,95	136	0,8	2
		50	1,0402	90,586	1,00	87	1,0	
		120	0,6684	132,74	1,00	199	1,5	

¹ Kg de fertilizante/ha; ² Toneladas de grãos/ha; ³ 1 = BOLSANELLO et al. (1975) e OLIVEIRA et al. (1982), p.155; 2 = MALAVOLTA (1989), p.273.

Tabela 4 - Eficiência de uso de fertilizantes (kg de feijão/kg de fertilizante) calculado com base nas equações da Tabela 3

Fertilizante (kg/ha)	Segundo fator	Eficiência de uso de fertilizantes (kg de grãos/kg de fertilizante) ¹						
		50 ²	100	150	200	250	300	
N	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
		40	10,9	2,1	0,8	0,4	0,3	0,2
		80	11,5	2,0	0,8	0,4	0,2	0,2
		100	14,2	2,9	1,1	0,6	0,4	0,3
N	P ₂ O ₅ (kg/ha)	0	0,6	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0
		50	2,8	0,9	0,4	0,2	0,1	0,1
		150	4,5	1,3	0,5	0,3	0,2	0,1
		250	7,9	3,0	1,3	0,7	0,5	0,3
P ₂ O ₅	N(kg/ha)	0	5,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0,0
		30	12,2	2,0	0,7	0,4	0,2	0,2
		60	15,3	2,9	1,1	0,6	0,4	0,3
P ₂ O ₅	N(kg/ha)	0	4,0	2,3	1,5	1,1	0,8	0,6
		50	6,9	3,3	1,9	1,2	0,9	0,6
		120	6,0	4,0	2,9	2,1	1,7	1,3

¹ Considerando US\$0,966/kg de N, US\$1,208/kg de P₂O₅ e US\$0,36/kg de feijão, são necessários 2,68 e 3,36 kg de feijão para pagar 1 kg de N ou P₂O₅. Eficiência pior que 2,68 ou 3,36:1 para N ou P₂O₅ não é economicamente desejável. Estes cálculos devem ser usados para escolher o nível de fertilização. ² Nível de fertilizante (kg/ha) - N nos dois primeiros casos ou P₂O₅ nos dois últimos casos.

O retorno econômico da fertilização de plantas depende da eficiência de uso de nutrientes, expressa em acréscimo na produção por quilograma da fonte

de nutriente, como apresentado na Figura 1C e Tabelas 2 e 4. O nível ótimo de uso de nutrientes ocorre quando o valor de venda da produção extra de grãos paga a

quantidade extra da fonte de nutrientes. Como exemplo, considerando US\$1,208/kg de P_2O_5 e US\$0,178/kg de soja, são necessários 6,8 kg de soja para pagar 1 kg de fertilizante. Eficiência menor que 6,8 kg de soja por kg de P_2O_5 não é vantajosa neste caso (Tabela 2).

O primeiro nutriente limitante aumentou a produtividade. Um segundo nutriente limitante pode aumentar, não alterar ou diminuir o k_{max} e k_s do primeiro nutriente limitante, em que os melhores efeitos são o aumento do k_{max} , a diminuição do k_s ou ambos. A Tabela 1 e Figura 1 ilustram diferentes valores de k_{max} e k_s do primeiro nutriente limitante que pode ser causado por outra limitação. As Tabelas 2 e 3 apresentam efeitos de um segundo nutriente limitante das constantes cinéticas do primeiro nutriente na produção de grãos.

A qualidade da semente, a variedade da planta, a fertilidade do solo (Figura 2), manejo, disponibilidade de água e práticas culturais podem causar mudanças na produtividade (k_{max} , k_s e eficiência de uso de nutrientes (Malavolta, 1989; Reid, 2002; Yadav, 2003). Entretanto, o fator que tem o maior efeito na eficiência de uso de nutrientes é o nível de fertilização, em que a eficiência diminui pelo aumento na quantidade do nutriente em questão.

Interpretação das respostas nutricionais como fenômeno de saturação tem importantes implicações para as recomendações de adubações. As recomendações estão relacionadas às taxas de crescimento, mas no futuro poderá ser possível relacionar as taxas de crescimento de porções específicas das curvas de respostas aos nutrientes e então obter níveis de recomendação de nutrientes (Morgan et al., 1975).

5. CONCLUSÕES

As respostas das plantas aos nutrientes apresentam curvas hiperbólicas e seguem o modelo de saturação cinética de Michaelis-Menten.

Os modelos de Michaelis-Menten e Lineweaver-burk podem ser usados como ferramentas para avaliar as interações entre os nutrientes e a eficiência de uso dos mesmos na recomendação de adubação.

É importante considerar o custo dos nutrientes, o lucro da produção extra e a eficiência de uso dos nutrientes na recomendação de adubação e usar, sustentavelmente, os recursos naturais não renováveis, para diminuir a poluição ambiental.

6. LITERATURA CITADA

- AARON, S. **Some statistics on limited natural resources**. 2005. In: [Http://scotaaron.com/resources2.html](http://scotaaron.com/resources2.html) (Acessado em 31 de Julho de 2008).
- Anderson-Cook, C.M.; Alley, M.M.; Noble, R. et al. Phosphorus and potassium fertilizer recommendation variability for two mid-atlantic coastal plain fields. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.1740-1747, 1999.
- ANGUS, J.F. **Modeling N fertilization requirements for crops and pasture**. In: BACON, P.E. (Ed.) Nitrogen fertilization in the environment. New York: Marcel Dekker inc., 1995. p.109-127.
- BOLSANELLO, J.; VIEIRA, C.; SEDIYAMA, C.S. et al. Ensaios de adubação nitrogenada e fosfatada no feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na zona metalúrgica de Minas Gerais. **Revista Ceres**, v.22, p.423-430, 1975.
- BULLOCK, D.G.; BULLOCK, D.S. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal N rate for corn. A comparison. **Agronomy Journal**, v.86, p.191-195, 1994.
- BUMB, B.L. **World nitrogen supply and demand: an overview**. In: BACON, P.E. (Ed.) Nitrogen fertilization in the environment. New York: Marcel Dekker inc., 1995. p.1-40.
- CERRATO, M.E.; BLACKMER, A.M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. **Agronomy Journal**, v.82, p.138-143, 1990.
- CHAMPE, P.C.; HARVEY, R.A. **Biochemistry**. 2nd ed. Philadelphia: J.B. Lippincott Company, 1994. 443p.
- GRANLI, T.; BOCKMAN, O.C. Nitrogen oxide from agriculture. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, v.12, p.7-127, 1994.
- HELYAR, K.R.; POTER, W.M. **Soil acidification, its measurement and the processes involved**. In: ROBSON, A.D. (Ed.) Soil acidity and plant growth. Sydney: Academic Press, 1989. p.61-100.



- HERRING, J.R.; FANTEL, R.J. Phosphate rock demand into the next century: Impact on world food supply. **Nonrenewable Resources**, v.2, n.3, p.226-246, 1993.
- JOKELA, W.E.; RANDALL, G. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1695-1703, 1997.
- KEBREAB, E.; FRANCE, J.; MILLS, J.A.N. et al. A dynamic model of N metabolism in the lactating cow and an assessment of impact on N excretion on the environment. **Journal of Animal Science**, v.80, p.248-259, 2002.
- LANA, R.P. Respostas das plantas à fertilização: aspectos biológicos, econômicos e ambientais. In: **Respostas biológicas aos nutrientes**. Viçosa, MG: Suprema, 2007. 205p.
- LANA, R.P.; ABREU, D.C.; CASTRO, P.F.C. et al. Milk production as a function of energy and protein sources supplementation follows the saturation kinetics typical of enzyme systems. In: 2nd International symposium on energy and protein metabolism and nutrition, 2007, Vichy. **Proceedings...** Vichy, França: European Association for Animal Production, 2007.
- LANA, R.P.; GOES, R.H.T.B.; MOREIRA, L.M. et al. Application of Lineweaver-Burk data transformation to explain animal and plant performance as a function of nutrient supply. **Livestock Production Science**, v.98, p.219-224, 2005.
- LANA, R.P.; RUSSELL, J.B. Use of potassium depletion to assess adaptation of ruminal bacteria to ionophores. **Applied and Environmental Microbiology**, v.62, p.4499-4503, 1996.
- LEMKE, R.L.; IZAURRALDE, R.C.; MALLEI, S.S. et al. Nitrous oxide emissions from agricultural soils of the Boreal and Parkland regions of Alberta. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1096-1102, 1998.
- LINEWEAVER, H.; BURK, D. The determination of enzyme dissociation constants. **Journal of the American Chemical Society**, v.56, p.658-666, 1934.
- MAKOWSKI, D.; WALLACH, D.; MEYNARD, J.-M. Model of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. **Agronomy Journal**, v.91, p.377-385, 1999.
- MAKOWSKI, D.; WALLACH, D.; MEYNARD, J.-M. Statistical methods for predicting responses to applied nitrogen and calculating optimal nitrogen rates. **Agronomy Journal**, v.93, p.531-539, 2001.
- MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 5.ed. São Paulo, SP: Ceres, 1989. 292p.
- MAROKO, J.B.; BURESH, R.J.; SMITHSON, P.C. Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.320-326, 1999.
- MICHAELIS, L.; MENTEN, M.L. Kinetics of invertase action. **Biochemistry Journal**, v.49, p.333-369, 1913.
- MITSCHERLICH, E.A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtsch Jahrbuch**, v.38, p.537-552, 1909.
- MOMBIELA, F.; NICHOLAIDES III, J.J.; NELSON L.A. A method to determine the appropriate mathematical form for incorporating soil test levels in fertilizer response models for recommendation purposes. **Agronomy Journal**, v.73, p.937-941, 1981.
- MONOD, J. The growth of bacterial cultures. **Annual Review of Microbiology**, v.3, p.371-394, 1949.
- MORGAN, H.P.; MERCER, L.P.; FLODIN, N.W. **General model for nutritional responses of higher organisms**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v.72, n.11, p.4327-4331, 1975.
- OLIVEIRA, A.J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W.J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA-DID, 1982. 326p.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V. et al. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, v.94, p.815-820, 2002.

REID, J.B. Yield response to nutrient supply across a wide range of conditions. 1. Model derivation. **Field Crops Research**, v.77, p.161-171, 2002.

ROBERTS, T.L.; STEWART, W.M. Inorganic phosphorus and potassium production and reserves. **Better Crops**, v.86, n.2, p.6-7, 2002.

RUSSELL, J.B. **Factors influencing competition and composition of the ruminal bacterial flora.** In: GILCHRIST, F.M.C.; MACKIE, R.I. (Eds.) *The Herbivore Nutrition in the Subtropics and Tropics*. Craighall, South Africa: Science Press, 1984. p.313-345.

SAIN, G.E.; JAUREGUI, M.A. Deriving fertilizer recommendations with a flexible functional form. **Agronomy Journal**, v.85, p.934-937, 1993.

STRONG, W.M. **Nitrogen fertilization of upland crops.** In: BACON, P.E. (Ed.) *Nitrogen fertilization in the environment*. New York: Marcel Dekker inc., 1995. p.129-169.

VAN DER PLOEG, R.R.; BÖHM, W.; KIRKHAM, M.B. On the origin of the theory of mineral nutrition of plants and the law of the minimum. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.1055-1062, 1999.

YADAV, R.L. Assessing on-farm efficiency and economics of fertilizer N, P and K in rice wheat systems of India. **Field Crops Research**, v.81, p.39-51, 2003.

