

FORMAS DE NITROGÊNIO E TIPO DE SUBSTRATO NOS PARÂMETROS DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO PELO MILHO-DOCE⁽¹⁾

F. L. I. M. SILVA⁽²⁾ & J. R. MAGALHÃES⁽³⁾

RESUMO

Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, em solo e em solução nutritiva, para testar, em milho-doce, o modelo matemático de Cushman-Barber, utilizado para prever a absorção de fósforo. Foram efetuadas análises de sensibilidade, para estudar o efeito, na absorção, da mudança de cada um dos parâmetros. A área superficial de raízes teve grande efeito na absorção de fósforo, em ambos os substratos, independente da fonte de nitrogênio. Verificou-se uma interação substrato x fonte de nitrogênio, embora a amplitude de absorção de fósforo fosse a mesma em todos os casos. Os resultados obtidos mostram que o suprimento de fósforo pelo substrato não foi o passo limitante na absorção desse nutriente pelas plantas.

Termos de indexação: *Zea mays* (L.), cinética de absorção de P, uréia, nitrato de sódio, modelo matemático, taxa de crescimento, raio médio.

SUMMARY: NITROGEN FORMS AND GROWTH MEDIA AFFECTING PHOSPHORUS UPTAKE PARAMETERS OF SWEET CORN

Two experiments were carried out with sweet corn under greenhouse conditions, with soil and solution culture, to adequate the Cushman-Barber's mathematical model used to predict phosphorus uptake. Sensitivity analyses were carried out to study the effect of changing each parameter of P uptake separately. The root surface area had great influence on phosphorus uptake, in both substrates used, independently of nitrogen form. An interaction between substrate and nitrogen form was observed although the phosphorus uptake range did not vary in all treatments. Results showed that phosphorus supply by the substrate was not the limiting factor in phosphorus uptake by plants.

Index terms: *Zea mays* (L.), P uptake kinetics, urea, sodium nitrate, mathematical model, root growth rate, mean root radius,

(1) Trabalho financiado pelo CNPq. Recebido para publicação em novembro de 1988 e aprovado em maio de 1990.

(2) Engenheira-Agrônoma, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo/EMBRAPA. Caixa Postal 151, 35700 Sete Lagoas, MG. Bolsista do CNPq.

(3) Pesquisador, CNPMS/EMBRAPA. 35700 Sete Lagoas, MG.

INTRODUÇÃO

A absorção iônica, cuja cinética afeta o suprimento de nutrientes e o crescimento das plantas, é uma das principais funções radiculares. A composição química das plantas é diretamente influenciada pela forma de nitrogênio absorvida, influenciando a forma de N fornecida no equilíbrio cátion/aniônico delas com grande efeito nos seus processos metabólicos. Há estreitas relações entre a capacidade de a raiz assimilar N e a nutrição mineral da planta, associadas à síntese de carboidratos nas folhas e ao suprimento de assimilados à raiz. Foi demonstrado que o nitrogênio estimula a absorção de fósforo pelos vegetais (Barneix, 1981), dependendo a intensidade desse aumento da concentração e forma química do nitrogênio aplicado. Thien & McFee (1970, 1972) demonstraram que o nitrogênio assimilado atua como chave nos processos de absorção de fósforo. A influência da fonte de nitrogênio utilizado sobre a absorção de fósforo é atribuída, entre outros, à redução do pH da rizosfera (Riley & Barber, 1971) e à formação de um complexo NH_4^+ -fósforo (Luisi et al., 1983). As variações na concentração de nutrientes nas plantas podem refletir diferenças na utilização de íons absorvidos, na eficiência de absorção ou em ambos. Assim, não é possível usar concentração de nutrientes na planta, ou em parte dela, como dado isolado para determinar a eficiência de absorção (Nielsen & Barber, 1978).

As concentrações de fósforo na solução do solo são baixas, quando comparadas com a de outros nutrientes, como nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio. Dentro da planta, o fósforo é um elemento altamente móvel, continuamente translocado: 90% de seu suprimento à raiz é feito por difusão. Solos com alta capacidade de retenção de água favorecem maior difusão de P para a zona das raízes; altas concentrações de P na solução do solo, associadas à capacidade genética da planta em absorvê-lo, favorecem o aumento da absorção. O desenvolvimento de genótipos mais eficientes em absorver P do solo parece ser uma possibilidade útil, se se puder determinar o controle genético das características que afetam a capacidade de absorção de fósforo: comprimento de raiz por grama de planta, raio médio de raiz, influxo máximo, K_m e $C_{mín}$ (Nielsen & Barber, 1978). Modelos matemáticos de simulação da absorção de nutrientes foram desenvolvidos para prever acuradamente a absorção de fósforo (Claassen & Barber, 1974, Barber & Cushman, 1981, e Barber, 1984).

O objetivo do presente trabalho foi testar o modelo matemático de absorção de nutrientes de Cushman-Barber, para milho-doce, e o uso de análise de sensibilidade de variação dos parâmetros envolvidos no modelo, na simulação de absorção de fósforo, em diferentes substratos e formas de nitrogênio.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados, em casa de vegetação, dois experimentos, de 1986 a 1988, com solo e em solução

nutritiva, com milho-doce, cultivar Super-doce, utilizando-se um latossolo vermelho-amarelo (LV) e um solo resultante da mistura do latossolo vermelho-amarelo (LV) com areia, na proporção de 1:1 (LV + areia). Antes da aplicação do fertilizante, efetuou-se a análise física e química desses substratos, e determinaram-se o poder tampão para fósforo, o coeficiente de difusão efetivo deste íon nesses substratos e a concentração inicial de P na solução do solo, conforme se descreverá adiante. Os dois substratos serão chamados de "não adubados". Incorporaram-se os fertilizantes ao solo na forma sólida, nas quantidades correspondentes, em mg/kg de solo, a: 1.000 de superfosfato triplo; 1.500 de hidróxido de cálcio; 900 de nitrato de sódio ou 300 de uréia; 200 de sulfato de potássio; 200 de sulfato de magnésio, 15 de bórax; 25 de sulfato de zinco e 15 de sulfato de cobre. O delineamento experimental, envolvendo os dois substratos, duas formas de nitrogênio, três épocas de colheita e quatro repetições, foi completamente casualizado. Sete dias após o plantio, foram medidos o comprimento inicial (Tennant, 1975) e o raio médio das raízes, a partir do comprimento e volume destas (Hallmark & Barber, 1981). Depois do desbaste, deixaram-se duas plantas por vaso. As plantas foram colhidas decorridos 16, 23 e 30 dias do plantio, para medir seus parâmetros fisiológicos no modelo.

Foram determinados onze parâmetros do modelo matemático de Cushman-Barber (Silva & Magalhães, 1989), a saber: comprimento inicial de raiz, L_0 (Tennant, 1975); taxa de crescimento radicular, k (Edwards & Horton, 1982 modificado); raio médio de raízes, r_0 (Hallmark & Barber, 1981); meia-distância entre os eixos radiculares, r_1 (Barber, 1984); influxo médio de água, v_0 (Schenk & Barber, 1979); coeficiente de difusão efetivo de P no solo, De (Barber, 1984); poder tampão de P; b (Barber, 1984); concentração inicial de P na solução do solo, Cl_i (Barber, 1984); influxo máximo, $I_{máx}$ (Ruiz, 1985); concentração da solução na qual o influxo é metade da velocidade máxima, K_m (Ruiz, 1985), e concentração mínima, $C_{mín}$ (Ruiz, 1985). Esses três últimos parâmetros foram determinados em experimento efetuado em solução nutritiva, sendo as plantas cultivadas por igual período às plantas crescidas em solo. Com exceção do comprimento inicial de raiz, os parâmetros do modelo foram determinados para cada época de colheita.

O coeficiente médio de difusão efetiva de P nos substratos (De) foi calculado pela fórmula $De = D_1\phi f_1/b$, onde D_1 é o coeficiente de difusão do íon em água; ϕ , a umidade volumétrica do solo, f_1 , o fator impedância, obtido por $f_1 = 0,99\phi - 0,172$ para o LV, e $1,60\phi - 0,172$ para o LV + areia (Barracough & Tinker, 1981) e b , o poder tampão. A umidade volumétrica do solo foi calculada a partir da capacidade de campo e da densidade do solo, tendo-se usado o valor de 0,30. Cl_i foi determinado pelo deslocamento da solução do solo saturado com água deionizada em uma coluna de 32cm de altura e 6cm de diâmetro interno. A análise de fósforo na solução do solo foi feita pelo método de Murphy & Riley (1962). A concentração dos nutrientes na solução nutritiva, até aos dez dias de idade das plantas, foi de: 4mM de K; 10mM de

N; 2mM de P; 4mM de Ca; 2mM de Mg; 0,5ppm de B; 0,5ppm de Mn; 0,05ppm de Zn; 0,02ppm de Cu; 0,01ppm de Mo; 2,5ppm de Fe como DTPA-Sequestrene 330 e 2,5ppm de Fe na forma de $\text{Fe}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Após esse período, nova solução nutritiva foi preparada para determinar a cinética de absorção para nitrogênio, potássio (dados não apresentados) e fósforo. As concentrações de potássio e fósforo foram alteradas para 3,75 e 1,00mM respectivamente. A nova solução foi preparada com diferentes fontes de nutrientes, em relação ao experimento de Silva & Magalhães (1989), utilizando-se KH_2PO_4 , KNO_3 e K_2SO_4 como fontes de potássio, sendo o restante do nitrogênio fornecido na forma de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Foram aplicados 10ppm de ferro. A solução era trocada freqüentemente durante todo o experimento, para manter constante o balanço dos nutrientes.

No período de depleção, o pH da solução nutritiva foi mantido na faixa de 5,5 a 6,0 com CaOH , não sendo colocado ferro na solução, para evitar interferência nas leituras de nitrogênio. Vinte e quatro horas antes da depleção, as plantas eram transferidas para uma

solução isenta de fósforo, mantendo-se a mesma concentração anterior para os demais nutrientes. Decorridas 24 horas para o estudo da cinética de absorção de P, adicionou-se fósforo à solução, na concentração de $30\mu\text{M}$, sendo retiradas alíquotas de hora em hora nas primeiras cinco horas, e de 30 em 30 minutos nas sete horas subsequentes ao início da depleção. Uma última alíquota foi retirada no dia seguinte e, após coleta da última alíquota, colheram-se as plantas. Na colheita, determinou-se peso fresco, peso de matéria seca, comprimento, raio médio e área radiculares, taxa de crescimento relativa, concentração de nutrientes na parte aérea e raiz (dados não apresentados) e os parâmetros de Michaelis-Menten, $I_{\text{máx}}$, K_m e $C_{\text{mín}}$. Curvas de depleção de fósforo, obtidas relacionando-se a concentração de fósforo nas alíquotas com o tempo, foram utilizadas, na determinação do influxo máximo, K_m e $C_{\text{mín}}$, conforme Ruiz (1985).

Efetuaram-se análises de sensibilidade, após checagem do modelo matemático, e diversas correlações; para a análise de sensibilidade, cada parâmetro foi variado de 0,5 a 2,0 vezes o seu valor inicial, independentemente dos demais parâmetros, que permaneciam constantes em seu valor.

Quadro 1. Parâmetros de solo não adubado e comprimento inicial de raiz, usados na análise de sensibilidade, para simulação matemática da absorção de P por milho-doce (dados experimentais)

Parâmetros ⁽¹⁾	LV ⁽²⁾	LV + areia
De (cm^2/s)	9,200E - 10	7,594E - 10
b	3,430E + 02	4,166E + 02
Cl_i ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$)	9,300E - 02	1,450E - 04
L_0 (cm/g raiz)	1,855E + 02	1,855E + 02

(1) De: coeficiente de difusão efetivo de P no solo; b: poder tampão de P; Cl_i : concentração inicial de P na solução do solo; L_0 : comprimento inicial de raiz.

(2) LV: latossolo vermelho-amarelo, LV + areia: latossolo vermelho-amarelo mais areia, na proporção de 1:1.

RESULTADOS

Os quadros 1 e 2 mostram valores experimentais usados para a análise de sensibilidade; destaca-se o elevado poder tampão para fósforo, no solo de cerrado, adubado (Quadro 2). Com exceção dos parâmetros $I_{\text{máx}}$, K_m e $C_{\text{mín}}$, que foram determinados experimentalmente em solução nutritiva, os demais referem-se ao ensaio em solo. Naquele com solução nutritiva, determinou-se a taxa de crescimento e raio médio radiculares, e P absorvido pelas plantas em cada inter-

Quadro 2. Valor inicial dos parâmetros de solo e de planta usados para simulação da absorção de P, pelo modelo matemático de Cushman-Barber (dados experimentais)

Parâmetros ⁽¹⁾	LV ⁽²⁾		LV + areia	
	Uréia	NaNO_3	Uréia	NaNO_3
De (cm^2/s)	1,673E - 10	1,301E - 10	6,819E - 10	6,372E - 10
b	1,891E + 03	2,432E + 03	1,198E + 03	1,282E + 03
Cl_i ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$)	1,354	0,967	1,967	2,094
v_0 ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	2,000E - 07	2,000E - 07	6,000E - 07	1,000E - 06
r_1 (cm)	8,970E - 01	9,950E - 01	1,092E + 00	9,190E - 01
r_0 (cm)	2,431E - 02	2,980E - 02	2,366E - 02	2,253E - 02
L_0 (cm/vaso)	3,420E + 01	3,420E + 01	3,420E + 01	3,420E + 01
k (cm/s)	1,605E - 02	2,100E - 02	2,419E - 02	1,501E - 02
$I_{\text{máx}}$ ($\mu\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	1,860E - 06	1,860E - 06	1,860E - 06	1,860E - 06
K_m ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$)	2,600E - 02	2,600E - 02	2,600E - 02	2,600E - 02
$C_{\text{mín}}$ ($\mu\text{mol}/\text{cm}^3$)	1,700E - 02	1,700E - 02	1,700E - 02	1,700E - 02

(1) De: coeficiente de difusão efetivo de P no solo; b: poder tampão de P; Cl_i : concentração inicial de P na solução do solo; v_0 : influxo de água para a raiz; r_1 : meia-distância entre os eixos radiculares; r_0 : raio médio de raiz; L_0 : comprimento inicial de raiz; k: taxa de crescimento radicular; $I_{\text{máx}}$: taxa de influxo máximo; K_m : concentração da solução onde o influxo é metade do $I_{\text{máx}}$; $C_{\text{mín}}$: concentração mínima de P na solução do solo.

(2) LV: latossolo vermelho-amarelo; LV + areia: latossolo vermelho-amarelo mais areia, na proporção de 1:1.

valo; esses dados, porém, não foram colocados na análise de sensibilidade apresentada. A determinação desses parâmetros fisiológicos também no ensaio com solução nutritiva teve como objetivo acompanhar o desenvolvimento das plantas, comparando-o com os resultados obtidos no ensaio em solo. Após a determinação experimental dos onze parâmetros do modelo, colocaram-se os dados em computador, sendo a absorção simulada de fósforo determinada matematicamente. Este valor estimado da absorção de P foi então comparado ao observado experimentalmente para igual tempo; determinado em função da quantidade de fósforo absorvido pelas plantas no período.

A absorção de fósforo nas plantas foi determinada experimentalmente, tanto para as plantas crescidas em solução nutritiva como usando LV e LV + areia (P absorvido nas três datas de colheita). A absorção de P estimada pelo modelo matemático é função dos parâmetros de solo e dos parâmetros fisiológicos da planta fornecidas ao modelo.

A figura 1 mostra análise de sensibilidade para o efeito, na absorção calculada de fósforo, da mudança dos parâmetros de absorção do modelo matemático de Cushman-Barber. Tal análise permite identificar os parâmetros de maior influência na absorção.

Para ambos os substratos e fontes de nitrogênio utilizados, a variação dos parâmetros D_e , b , v_0 , r_1 e L_0 não afetou a absorção de P. Os resultados mostram que a absorção de fósforo cresce rapidamente com os aumentos de r_0 , k e $I_{máx}$, indicando assim que a área superficial das raízes teve grande efeito na absorção. O aumento da taxa de crescimento relativa representa um aumento do total de P disponível para a planta, mantidos os demais parâmetros constantes.

Os valores dos quadros 1 e 2 são experimentais. Para a análise de sensibilidade, eles foram simuladamente, alterados para 0,5 e 2,0 vezes o seu índice, para a obtenção das curvas das figuras 1 e 2.

Houve interação entre tipo de solo e forma de N usada, uma vez que a absorção no LV, quando uréia foi a fonte de N, foi menor do que quando se utilizou $NaNO_3$ o inverso do que ocorreu no LV + areia. Todavia, a amplitude máxima de absorção foi similar para os dois substratos.

A concentração mínima de P na solução do solo diminuiu a absorção simulada, pois, quanto maior esta concentração, menor a eficiência das raízes em absorver o elemento da solução do solo.

O fluxo de água teve pequeno efeito na absorção de P, uma vez que o fornecimento deste foi feito, predominantemente, por difusão; r_1 também teve efeito quase nulo, visto que o valor do coeficiente de difusão efetivo é baixo, para fósforo, e houve pouca competição entre raízes.

Dentro dos níveis estudados, os resultados sugerem que o suprimento de fósforo pelo solo não foi fator limitante na absorção.

Na figura 2, onde foram colocados os parâmetros de D_e , b e Cl_i dos mesmos substratos antes de qualquer

adubação, pode-se verificar que no LV + areia houve menor absorção de fósforo em relação ao LV; isso poderia ser explicado pela maior espessura radicular, que, por sua vez, diminuiria a eficiência da absorção. Assim, ao aumentar a meia-distância entre os eixos radiculares, diminui o volume de solo explorado pelas raízes.

Em relação ao LV, a mistura LV + areia, por conter mais material inerte, contém a metade da concentração de P, causando efeito negativo na sua absorção, tendo uma Cl_i mais baixa.

No LV, a forma nítrica aumentou a absorção de fósforo (Figuras 1 e 2), independentemente de se trabalhar com valores de D_e , b e Cl_i de substrato adubado ou não.

O quadro 3 mostra a relação entre a absorção de fósforo observada experimentalmente e a predita pelo modelo matemático de Cushman-Barber. Pelos resultados, o modelo foi eficiente, em geral, para prever a absorção de fósforo por milho-doce, para o período experimental estudado (plantas com 10 dias de idade, ou seja, aos 16 dias após o plantio).

Quadro 3. Relação entre a absorção de fósforo observada experimentalmente e a absorção predita pelo modelo matemático de Cushman-Barber, para milho-doce, em diferentes tipos de substrato e formas de nitrogênio

Tipo de substrato	Formas de N	Absorção de P (mmol/vaso)	
		Observada experimentalmente	Predita pelo modelo matemático
LV ⁽¹⁾	Uréia	1,07	1,00
	$NaNO_3$	1,05	1,58
LV + areia	Uréia	1,47	1,54
	$NaNO_3$	1,02	0,90

(1) LV: latossolo vermelho-amarelo; LV + areia: latossolo vermelho-amarelo mais areia, na proporção de 1:1.

Isso indica que se pode utilizar o modelo, com bom nível de confiança, para prever a absorção de fósforo por milho-doce, dentro das condições experimentais desses ensaios.

DISCUSSÃO

Entre outros parâmetros, a absorção de fósforo pelas plantas pode ser estimada pela quantidade de fósforo disponível no solo, pelo padrão de crescimento do sistema radicular e por fatores ambientais que influenciam o crescimento das raízes.

Para a discussão da análise de sensibilidade, descrevem-se os efeitos da mudança dos parâmetros, admitindo-se que a planta esteja tendo quantidade insuficiente do nutriente em questão, mas não esteja grandemente deficiente. Assim, os aumentos no fornecimento pelo solo ou na taxa de absorção pela raiz resultam em maior absorção.

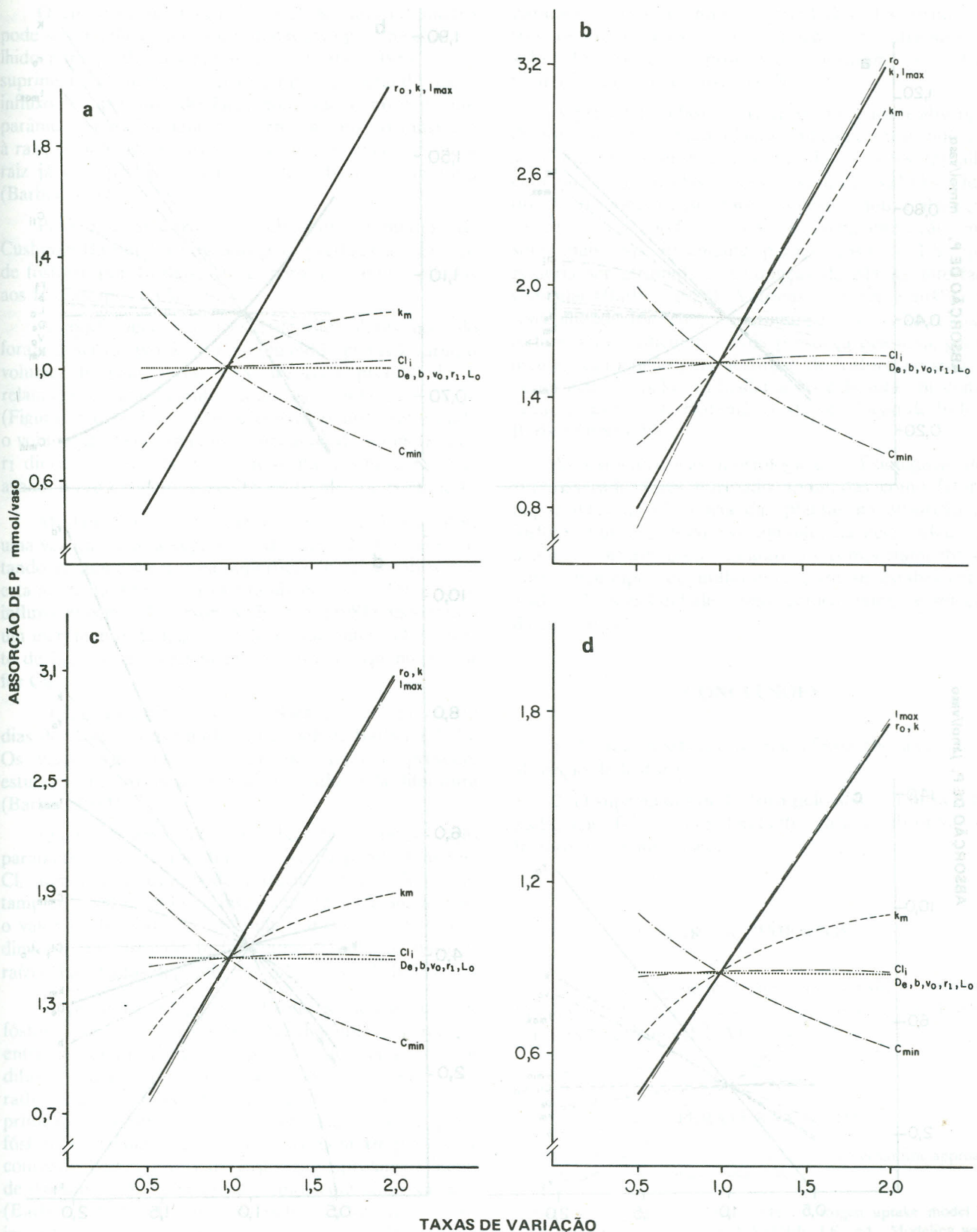


Figura 1. Análise de sensibilidade para o efeito, na absorção calculada de P, da mudança dos parâmetros do modelo matemático de Cushman-Barber (solo adubado): a: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo, com uréia como fonte de N; b: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo, com nitrato como fonte de N; c: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo + areia (1:1) com uréia como fonte de N; d: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo + areia (1:1) com nitrato como fonte de N. D_e : coeficiente de difusão efetivo de P no solo, cm^2/s ; b : poder tampão de P (sem unidades); C_i : concentração inicial de P na solução do solo, $\mu mol/cm^3$; v_0 = influxo de água para a raiz, $cm^3/cm^2 \cdot s$; r_1 : meia-distância entre os eixos radiculares, cm ; r_0 : raio médio de raiz, cm ; L_0 : comprimento inicial de raiz, $cm/vase$; k : taxa de crescimento radicular, cm/s ; $I_{máx}$: taxa de influxo máximo, $\mu mol/cm^2 \cdot s$; K_m : concentração da solução onde o influxo é metade do $I_{máx}$, $\mu mol/cm^3$; $C_{mín}$: concentração mínima de P na solução do solo, $\mu mol/cm^3$.

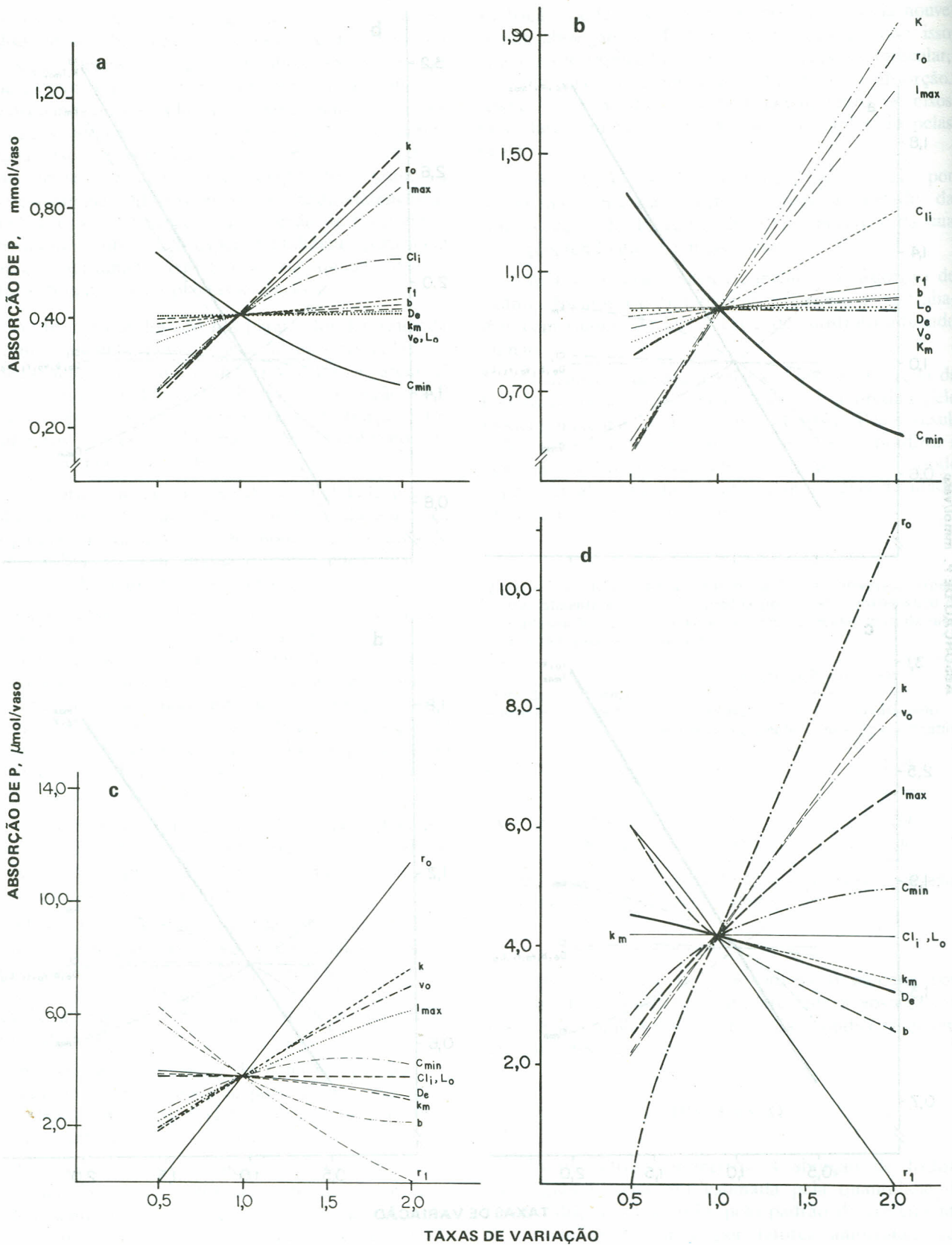


Figura 2. Análise de sensibilidade para o efeito, na absorção calculada de P, da mudança dos parâmetros do modelo matemático de Cushman-Barber (solo não adubado) a: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo, com uréia como fonte de N; b: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo, com nitrato como fonte de N; c: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo + areia (1:1) com uréia como fonte de N; d: milho-doce cultivado em latossolo vermelho-amarelo + areia (1:1) com nitrato como fonte de N. De: coeficiente de difusão efetivo de P no solo, cm^2/s ; b: poder tampão de P (sem unidades); Cl_i : concentração inicial de P na solução do solo, $\mu\text{mol}/\text{cm}^3$; v_o = influxo de água para a raiz, $\text{cm}^3/\text{cm}^2\cdot\text{s}$; r_1 : meia-distância entre os eixos radiculares, cm; r_o : raio médio de raiz, cm; L_o : comprimento inicial de raiz, cm/vaso; k: taxa de crescimento radicular, cm/s; $I_{\text{máx}}$: taxa de influxo máximo, $\mu\text{mol}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$; K_m : concentração da solução onde o influxo é metade do $I_{\text{máx}}$, $\mu\text{mol}/\text{cm}^3$; $C_{\text{mín}}$: concentração mínima de P na solução do solo, $\mu\text{mol}/\text{cm}^3$.

O efeito da mudança do nível de cada parâmetro pode ser significativamente influenciado pelo nível escolhido para os demais parâmetros (Barber, 1984). Se o suprimento de nutrientes para a raiz é tão grande que o influxo se aproxima do $I_{máx}$, mudando o nível de um parâmetro para aumentar o fornecimento do nutriente à raiz, pouco efeito haverá na absorção, uma vez que a raiz já está perto da sua taxa de absorção máxima (Barber, 1984).

Para essa análise de sensibilidade, o modelo de Cushman-Barber foi utilizado para prever a absorção de fósforo, por 10 dias, isto é, para as plantas colhidas aos 16 dias após o plantio.

A morfologia e a densidade radiculares no solo foram descritas por k , r_0 e r_1 . Quando apenas k varia, o volume de solo varia, e a absorção predita de P relaciona-se linearmente com as mudanças de k (Figuras 1 e 2). Uma avaliação mais realista seria onde o volume de solo é mantido constante, de tal modo que r_1 diminui à medida que k aumenta; assim, é possível avaliar o crescimento radicular em termos de r_1 ou de k .

Mudando o raio de raiz, r_0 , geram-se dois efeitos: uma vez que a área superficial de raiz é $2\pi r_0L$, aumentando r_0 aumenta a área superficial para absorção, e esta aumenta. O raio da raiz também pode influenciar o influxo máximo; Peterson & Barber (1981) mostraram um incremento de $I_{máx}$ quando r_0 aumentou. O aumento de $I_{máx}$ afeta grandemente a absorção, quanto maior for Cl_i .

O influxo de fósforo em plantas de milho de 12 dias de idade foi estudado por Jungk & Barber (1975). Os valores de influxo observados para o presente estudo encontram-se na faixa citada pela literatura (Barber, 1984).

Quando um solo recebe fertilizantes, três parâmetros seus são afetados interdependentemente; Cl_i aumenta, o que pode reduzir o valor do poder tampão; o valor de De é inversamente relacionado com o valor de b , portanto ele aumentará à medida que b diminuir. O fluxo de fósforo através do solo para as raízes das plantas depende dos valores de Cl_i , b e De .

A presença de pêlos radiculares na absorção do fósforo do solo provavelmente dependa da relação entre o comprimento dos pêlos e do coeficiente de difusão efetivo para o fósforo no solo. Os pêlos radiculares de milho têm cerca de 0,3mm de comprimento (Barber, 1984), e a distância média a que o fósforo se difunde, em quatro dias, com De para solos contendo baixos níveis de fósforo, é aproximadamente de 0,63mm, e de 0,88mm para solos com alto teor de P (Barber, 1984). Então, os pêlos radiculares seriam importantes em aumentar a depleção de P do solo, perto das raízes.

Na faixa de fertilização utilizada, o suprimento de fósforo do solo para as raízes não foi fator limitante na absorção, como mostram as figuras 1 e 2.

Claassen & Barber (1977) desenvolveram uma relação matemática descrevendo o fluxo de nutrientes do solo para a raiz. Essa relação prediz a quantidade de nutrientes absorvida pela planta. O modelo usa sete

parâmetros descrevendo propriedades das plantas e três, os mecanismos de fornecimento de nutrientes do solo. Investigações posteriores levaram a outros modelos, como o de Cushman-Barber.

A principal ênfase neste trabalho, para a absorção de íons, foi dada para plantas intactas, crescendo em solo, embora a grande maioria dos autores trabalhe com raízes destacadas. Quando se usou $NaNO_3$ (Quadro 3), o modelo matemático superestimou a absorção calculada. Isso pode ser devido a uma interação raiz-solo, mais especificamente para o caso de LV, que poderia ser atribuída a mudanças de pH na interface radicular (Barber, 1984). A discussão sobre a análise de sensibilidade foi feita, admitindo-se que as raízes não teriam pêlos radiculares, cuja presença ocasiona, geralmente, competição pela absorção de fósforo no solo. A ocorrência de pêlos radiculares só é levada em consideração no modelo matemático de simulação de Itoh & Barber (1983a, b).

As características morfológicas e fisiológicas dos sistemas radiculares têm sido apontadas como fatores importantes na eficiência das plantas na absorção de fósforo (Furlani, 1988). No entanto, há necessidade de maiores informações quanto ao comportamento de outros genótipos de milho-doce para se estabelecer a análise de sensibilidade como técnica única de seleção de cultivares.

CONCLUSÕES

1. A área superficial de raiz afetou enormemente a absorção de fósforo.
2. O suprimento de fósforo pelo solo, na faixa estudada, não foi o fator limitante para a absorção de fósforo pelo milho-doce.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Drs. Gerald E. Wilcox e Stanley A. Barber o apoio e orientação em Purdue University, Indiana (EUA).

LITERATURA CITADA

- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York, John Wiley, 1984. 398p.
- BARBER, S.A. & CUSHMAN, J.H. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: INSKANDER, I.K., ed. Modeling waste water renovation-land treatment. New York, Wiley-Interscience, 1981. p.382-409.
- BARNEIX, A.J. Cinética de absorción de fosfato por plantas de trigo pretratadas con amonio o nitrato. Oytón, Buenos Aires, 41:45-51, 1981.
- BARRACLOUGH, P.B. & TINKER, P.B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. J. Soil Sci., London, 32:225-236, 1981.

- CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and the flux into roots of intact plants. *Pl. Physiol.*, Rockville, 54:564-568, 1974.
- CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. Potassium influx characteristics of corn roots and interaction with N, P, Ca and Mg influx. *Agron. J.*, Madison, 69:860-864, 1977.
- EDWARDS, J.H. & HORTON, B.D. Interaction of peach seedlings to $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ ratios in nutrient solution. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, Madison, 107:142-147, 1982.
- FURLANI, A.M.C. Variações em parâmetros de cinética de absorção de fósforo de três linhagens de arroz. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 12:77-80, 1988.
- HALLMARK, W.B. & BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake and nutrient status of soybean as affected by soil K and bulk density. *Agron. J.*, Madison, 73:779-782, 1981.
- ITOH, S. & BARBER, S.A. A numerical solution of whole plant nutrient uptake for soil-root systems with root hairs. *Pl. Soil*, The Hague, 70:403-413, 1983a.
- ITOH, S. & BARBER, S.A. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. *Agron. J.*, Madison, 75:457-461, 1983b.
- JUNGK, A. & BARBER, S.A. Plant age and the phosphorus uptake characteristics of trimmed and untrimmed corn root systems. *Pl. Soil*, The Hague, 42:227-239, 1975.
- LUISE, M.V.V.; ROSSIELLO, R.O.P. & FERNANDES, M.S. Formas de nitrogênio e níveis de potássio sobre a absorção de fósforo por milho. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 18(4):343-350, 1983.
- MURPHY, J. & RILEY, O.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. *Anal. Chem. Acta*, Amsterdam, 27:31-36, 1962.
- NIELSEN, N.E. & BARBER, S.A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. *Agron. J.*, Madison, 70:695-698, 1978.
- PETERSON, W.R. & BARBER, S.A. Soybean root morphology and potassium uptake. *Agron. J.*, Madison, 73:311-319, 1981.
- RILEY, D. & BARBER, S.A. Effect of ammonium and nitrate fertilization in phosphorus uptake as related to root-induced pH changes at the root-soil interface. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, 35:301-306, 1971.
- RUIZ, H.A. Estimativas dos parâmetros cinéticos K_m e $V_{máx}$, por uma aproximação gráfico-matemática. *R. Ceres*, Viçosa, 32:79-84, 1985.
- SCHENK, M.K. & BARBER, S.A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 43:880-883, 1979.
- SILVA, F.L.I.M. & MAGALHÃES, J.R. Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados na simulação de absorção de fósforo pelo tomateiro, com o uso do modelo matemático de Cushman-Barber. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 13:315-320, 1989.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, London, 63:995-1001, 1975.
- THIEN, S.J. & McFEE, W.W. Effect of nitrogen on phosphorus transport systems in *Zea mays* L. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, 36:617-624, 1972.
- THIEN, S.J. & McFEE, W.W. Influence of nitrogen on phosphorus absorption and translocation in *Zea mays* L. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, 34:87-90, 1970.