

FLUXO DE MASSA E DIFUSÃO DE ENXOFRE PARA RAÍZES DE MILHO EM SOLOS ÁCIDOS DE MINAS GERAIS⁽¹⁾

D. J. SILVA⁽²⁾, V. H. ALVAREZ V.⁽³⁾ & H. A. RUIZ⁽³⁾

RESUMO

Com o objetivo de avaliar a contribuição do fluxo de massa e da difusão no transporte de enxofre à superfície das raízes de milho, desenvolveu-se um ensaio em casa de vegetação, entre dezembro de 1991 e janeiro de 1992, utilizando-se amostras superficiais (0-20 cm) de três solos ácidos dos municípios mineiros de Viçosa, Paracatu e Lassance. Essas amostras apresentavam, respectivamente, 5,0, 1,2 e 1,4 mg dm⁻³ de S disponível, obtidos pelo extrator Ca(H₂PO₄)₂, 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹. O experimento correspondeu a um fatorial 3 x 5, sendo três solos e cinco doses de enxofre (0, 20, 40, 80 e 160 mg dm⁻³), estando os tratamentos dispostos em blocos casualizados, com quatro repetições. A umidade, controlada pelo uso de um tensiômetro por vaso, foi mantida próxima a -10 kPa durante todo o ensaio. Colhido o experimento, determinaram-se as concentrações de enxofre na planta e na solução do solo. A contribuição do fluxo de massa foi determinada, multiplicando-se a concentração de enxofre no extrato da pasta de saturação pelo volume de água transpirada pela planta. O enxofre transportado por difusão foi calculado, subtraindo-se do enxofre total acumulado na planta o valor correspondente ao enxofre transportado por fluxo de massa. O fluxo de massa foi o principal mecanismo de transporte de enxofre para a superfície radicular do milho. Quando a concentração de enxofre na solução do solo foi alta, esse mecanismo supriu quantidades de enxofre superiores às absorvidas pela planta. A contribuição da difusão para o suprimento de enxofre ocorreu, apenas, em baixa concentração desse nutriente na solução do solo.

Termos de indexação: enxofre, transporte no solo, solução do solo, *Zea mays*.

SUMMARY: *SULPHUR MASS FLOW AND DIFFUSION TOWARD CORN ROOTS IN ACID SOILS FROM MINAS GERAIS STATE, BRAZIL*

A greenhouse experiment was carried out during the period October, 1991 to December, 1992, to evaluate the mass flow and diffusion contributions on sulphur transport to corn roots in soil surface samples (0-20 cm) of three acid soils collected in Viçosa, Paracatu and Lassance,

⁽¹⁾ Parte da tese de doutorado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Viçosa. Trabalho apresentado na XXI Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Recebido para a publicação em janeiro de 1997 e aprovado em fevereiro de 1998.

⁽²⁾ Pesquisador da EMBRAPA-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido. Caixa Postal 23, CEP 56300-000 Petrolina (PE). E-mail: davi@cpatsa.embrapa.br.

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq.

Minas Gerais State, Brazil. Originally, the soil samples presented 5.0, 1.2 and 1.4 mg dm⁻³ of available S, respectively, obtained by extraction with a Ca(H₂PO₄)₂ solution containing 500 mg L⁻¹ of P in HOAc 2 mol L⁻¹ solution. A 3 x 5 factorial layout was used with three soils and five sulphur levels (0, 20, 40, 80 and 160 mg dm⁻³), arranged in randomized complete block design, with four replications. Tensiometers controlled the soil water potencial in each pot and it was maintained at approximately -10 kPa. The mass flow contribution was calculated multiplying sulphur concentration on soil saturation extract by volume of transpired water. The difference between total sulphur absorbed and mass flow contribution was assumed to be due to diffusion contribution. Mass flow was the main process of sulphur transport to corn roots. At high sulphur concentration in soil solution, the sulphur quantities supplied by mass flow were higher than those required by plants. Diffusion process contributed to sulphur transport only at low sulphur concentration in soil solution.

Index terms: sulphur; soil transport, soil solution, Zea mays.

INTRODUÇÃO

Para que sejam absorvidos pela planta, os nutrientes devem ser transportados até a superfície das células da raiz. O transporte dos íons presentes na solução do solo até as raízes dos vegetais é feito por fluxo de massa e por difusão.

O fluxo de massa está associado ao gradiente de potencial hídrico provocado pela absorção de água pelas plantas. Desse modo, a concentração do íon na solução do solo e a taxa de transpiração do vegetal determinam a quantidade transportada por esse mecanismo. A difusão, por sua vez, é causada pelo movimento térmico ao acaso dos íons em direção à raiz, em virtude do gradiente de concentração gerado na superfície radicular (Barber, 1984).

Além desses dois mecanismos, a intercepção radicular também seria responsável pelo suprimento de nutrientes às plantas. Barber (1984), entretanto, considera praticamente desprezível a sua participação no suprimento de enxofre, e Patel et al. (1984) questionam o seu verdadeiro significado, uma vez que o efeito do alongamento da raiz está incluído nos modelos de difusão mais recentes.

O fluxo de massa é o principal mecanismo de suprimento de enxofre às raízes. Barber et al. (1963), utilizando auto-radiografia, demonstraram que o ³⁵S aplicado uniformemente em todo o volume de solo do vaso moveu-se, juntamente com a água, para a superfície das raízes de milho. Trabalhando em solos com alta concentração de sais, Ende (1973) observou que o fluxo de massa seria capaz de suprir sulfato, cloreto, cálcio, magnésio e sódio em concentrações maiores que aquelas absorvidas pelas raízes do tomateiro. Gregory et al. (1979) também detectaram uma contribuição do fluxo de massa quatro vezes maior que a quantidade de enxofre absorvida por plantas de trigo (*Triticum aestivum*), cultivadas em um solo com altos níveis desse nutriente. Mesmo em um solo ácido e bastante intemperizado, mas com um suprimento adequado de enxofre, Prenzel (1979) verificou que o fluxo de massa transportou uma quantidade de enxofre suficiente para acumular-se em torno das raízes de faia (*Fagus sylvatica*).

Desse modo, em condições de elevada concentração de enxofre na solução do solo, devida à fertilidade natural do solo ou à aplicação de fertilizantes, o fluxo de massa promoveria o suprimento do nutriente em quantidades suficientes para as plantas. Por outro lado, em solos mais intemperizados, com baixa concentração de nutrientes na solução do solo, o fluxo de massa poderia ser insuficiente para satisfazer à demanda.

O presente trabalho objetivou avaliar a contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão de enxofre às raízes de milho, em três solos de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras coletadas na camada superficial (0-20 cm) de três solos (Quadro 1), pertencentes aos municípios mineiros de Viçosa (VI), Paracatu (PA) e Lassance (LA). Essas amostras, depois de secas ao ar, foram passadas em peneira de 4 mm, divididas em subamostras de 5 dm³, recebendo, em seguida, uma mistura de carbonatos de cálcio e de magnésio na relação molar de 4:1. A quantidade de corretivo aplicada baseou-se nos teores de argila e de cátions trocáveis existentes em cada amostra de solo (Comissão..., 1989). Após a calagem, as amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas e incubadas, mantendo-se a umidade em torno de -10 kPa, por um período de 30 dias. O solo LA não recebeu calagem, tampouco foi incubado, uma vez que apresentava elevados teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ numa relação adequada, além de teor de Al³⁺ abaixo do limite de detecção pelo método empregado.

Após secagem e homogeneização, as amostras de solo receberam os tratamentos com enxofre: 0, 20, 40, 80 e 160 mg dm⁻³ de S, além de doses de nivelamento para N (50 mg dm⁻³), P (450 mg dm⁻³ nos solos VI e PA e 300 mg dm⁻³ no solo LA) e K (150 mg dm⁻³ menos o K disponível), fornecidos pelos sais K₂SO₄, (NH₄)₂SO₄, MgSO₄, NH₄H₂PO₄, KH₂PO₄ e Ca(H₂PO₄)₂.

Quadro 1. Características físicas e químicas das amostras superficiais dos solos de Viçosa (VI), de Paracatu (PA) e de Lassance (LA)

Característica	Solo		
	VI	PA	LA
Areia grossa, g kg ⁻¹	140	10	210
Areia fina, g kg ⁻¹	80	10	290
Silte, g kg ⁻¹	110	140	220
Argila, g kg ⁻¹	670	840	280
Equivalente de umidade, kg kg ⁻¹	0,32	0,30	0,22
Água retida, kg kg ⁻¹			
-5 kPa	0,48	0,38	0,28
-10 kPa	0,37	0,33	0,26
-40 kPa	0,34	0,32	0,20
-100 kPa	0,30	0,30	0,16
Carbono orgânico, g kg ⁻¹	13	26	11
pH-H ₂ O	4,9	5,1	5,0
Al ³⁺ , mmol _c dm ⁻³	6,3	3,6	0,0
Ca ²⁺ , mmol _c dm ⁻³	2,0	3,0	46,7
Mg ²⁺ , mmol _c dm ⁻³	1,0	1,0	9,3
K, mg dm ⁻³	9,0	41,0	71,6
P, mg dm ⁻³	0,2	0,0	5,1
S, mg dm ⁻³⁽¹⁾	5,0	1,2	1,4

(1) Extrator Ca(H₂PO₄)₂, 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹.

A umidade foi ajustada, gravimetricamente, para -10 kPa. As amostras, umedecidas e colocadas em sacos plásticos fechados, foram mantidas, por sete dias, nessas condições, para obter maior uniformidade na distribuição de umidade do material.

No experimento, desenvolvido em casa de vegetação entre dezembro de 1991 e janeiro de 1992, utilizou-se, como planta indicadora, o milho (*Zea mays* L.), híbrido Pioneer 3.210. O ensaio correspondeu a um fatorial 3 x 5 (três solos e cinco doses de S), estando os tratamentos dispostos em blocos casualizados, com quatro repetições.

A unidade experimental foi constituída por um vaso plástico com 4,5 dm³ de solo. Após o período de uniformização da umidade, as amostras de solo foram acondicionadas nos vasos, realizando-se, em seguida, o plantio de cinco sementes por vaso. Após a emergência, efetuou-se um desbaste, deixando-se três plantas por vaso.

A umidade, controlada pelo uso de um tensiômetro por vaso (Ruiz, 1986), foi mantida, com água destilada, próxima a -10 kPa durante todo o experimento. O volume de água evaporada no decorrer do experimento foi estimado, utilizando-se vasos com solo sem planta. A cada bloco foram acrescentados três vasos sem planta, um para cada solo em estudo.

A quantidade de água transpirada pelas plantas foi determinada, subtraindo-se do volume total aplicado em cada vaso a quantidade evaporada.

Para reduzir as perdas de água por evaporação, a superfície do solo de cada vaso foi coberta com uma camada de esferas de isopor com diâmetro de 2 a 7 mm.

Semanalmente, foram aplicados a cada unidade experimental 25 mg dm⁻³ de N, fornecidos como (NH₂)₂CO em forma de solução. Os micronutrientes também foram fornecidos em solução, de modo que fossem adicionados a cada dm³ de solo 0,813 mg de B (H₃BO₃), 3,664 mg de Mn (MnCl₂.4H₂O), 4 mg de Zn (ZnCl₂), 1,329 mg de Cu (CuCl₂.2H₂O), 1,556 mg de Fe (FeCl₃.6H₂O) e 0,15 mg de Mo (Na₂MoO₄.2H₂O) (Alvarez V., 1974). Essas doses foram igualmente parceladas em quatro aplicações.

Trinta e dois dias após o plantio, a parte aérea e as raízes de milho foram colhidas e secas em estufa de ventilação forçada a 70°C, onde permaneceram até peso constante. Após a secagem, o material vegetal foi moído e mineralizado por digestão nítrico-perclórica e, no extrato obtido, procedeu-se à dosagem do S por turbidimetria (Blanchar et al., 1965).

Amostras de solo de todas as unidades experimentais foram secas e passadas em peneira de 2 mm. Em seguida, foram tomadas subamostras para a extração da solução do solo. A solução do solo foi obtida pelo método do extrato da pasta de saturação (EMBRAPA, 1979), sendo a sua concentração em S dosada por turbidimetria (Chesnin & Yien, 1950).

Para determinar a contribuição do fluxo de massa para o transporte de S, multiplicou-se a quantidade de água transpirada pelas plantas pela concentração do nutriente existente no extrato da pasta de saturação (Oliver & Barber, 1966).

O S transportado por difusão foi calculado, subtraindo-se do S total acumulado na planta o valor correspondente ao S transportado por fluxo de massa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelos dados de enxofre transportado por fluxo de massa e de conteúdo de enxofre (Quadro 2), observa-se que o fluxo de massa, de modo geral, transportou quantidades de enxofre superiores àquelas absorvidas pelas plantas. Nos tratamentos em que o fluxo de massa não foi capaz de satisfazer à demanda de enxofre das plantas, o mecanismo de difusão complementou seu suprimento.

Os valores obtidos para fluxo de massa e conteúdo de enxofre foram ajustados às doses de enxofre aplicadas, por meio de equações de regressão (Figura 1). Uma vez que a difusão complementa a absorção por fluxo de massa, sua contribuição não foi quantificada diretamente, sendo obtida pela diferença entre o conteúdo de enxofre na planta e a quantidade potencialmente transportada por fluxo de massa.

Na análise de regressão, foram eliminados os dados de conteúdo de enxofre, correspondentes às doses de 80 mg dm⁻³ de S no solo VI, por causa da compactação observada em três repetições desse tratamento, o que

Quadro 2. Concentração de enxofre na solução do solo (SSOL), enxofre potencialmente transportado por fluxo de massa (FM) e conteúdo de enxofre (CS) das plantas de milho, em função das doses de S aplicadas em amostras dos solos de Viçosa, de Paracatu e de Lassance

Variável	Doses de S				
	0	20	40	80	160
	mg dm ⁻³				
Solo Viçosa					
SSOL, mg L ⁻¹ (1)	21,15	35,16	44,68	62,48	124,80
FM, mg vaso ⁻¹	50,24	121,58	146,53	220,19	511,14
CS, mg vaso ⁻¹	38,12	58,46	62,10	64,59	89,52
Solo Paracatu					
SSOL, mg L ⁻¹ (1)	2,93	3,36	10,07	22,09	66,08
FM, mg vaso ⁻¹	14,63	16,52	46,72	92,23	295,48
CS, mg vaso ⁻¹	42,61	63,74	62,94	60,82	62,53
Solo Lassance					
SSOL, mg L ⁻¹ (1)	4,20	7,08	10,94	32,12	80,17
FM, mg vaso ⁻¹	27,73	46,93	59,25	224,33	569,70
CS, mg vaso ⁻¹	79,51	84,94	76,45	99,59	119,76

(1) Extrato de saturação.

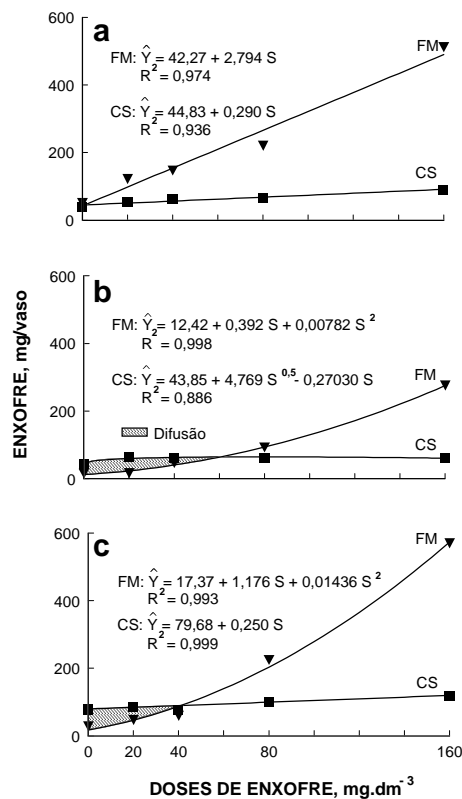


Figura 1. Enxofre potencialmente transportado por fluxo de massa até a superfície das raízes (FM) e conteúdo de enxofre (CS) das plantas de milho, em função das doses de S aplicadas em amostras dos solos de Viçosa (a), de Paracatu (b) e de Lassance (C).

prejudicou a produção de matéria seca, e 40 mg dm⁻³ no solo LA, por fugirem à tendência observada para os demais valores.

O conteúdo de enxofre das plantas aumentou em resposta às doses de S aplicadas. No solo PA, houve pequeno acréscimo no conteúdo de enxofre, o que foi explicado por um modelo raiz quadrada ($R^2 = 0,886$). Essa resposta, no entanto, se levar em consideração a produção de matéria seca, o conteúdo e o teor de enxofre na planta, permite evidenciar um efeito de concentração (Jarrell & Beverly, 1981).

O fluxo de massa predominou em quase todos os tratamentos e foi o principal mecanismo de suprimento de S às raízes, o que corrobora os resultados de outros autores (Ende, 1973; Gregory et al., 1979).

No solo VI, o fluxo de massa foi responsável por todo o enxofre transportado até a superfície das raízes (Figura 1). A difusão não se fez presente, dada a elevada concentração de enxofre na solução desse solo.

As quantidades de enxofre supridas por fluxo de massa aumentaram linearmente com a aplicação de doses crescentes de enxofre no solo VI. A elevada concentração de enxofre obtida na solução desse solo, e a disponibilidade de água, mantida em torno de -10 kPa durante todo o experimento, possibilitariam o acúmulo de enxofre na superfície das raízes, decorrente do fluxo de massa. Outros nutrientes transportados por fluxo de massa, como Ca e Mg (Strebel & Duynisveld, 1989), podem acumular-se na superfície das raízes. Esses resultados também confirmam as observações de Gregory et al. (1979), que relatam acúmulo de S, Ca, Mg e Na em torno das raízes do trigo, decorrente do transporte por fluxo de massa.

Como a quantidade de enxofre transportada até a superfície das raízes foi excessiva, uma maior absorção aumentaria a sua concentração na planta sem incremento na produção de matéria seca, caracterizando um *consumo de luxo*. Esse comportamento foi verificado por Bissani (1985) em plantas de colza cultivadas em solos do Rio Grande do Sul, sob ampla variação dos teores de S disponível. Embora existam evidências de *consumo de luxo*, a concentração de enxofre nas plantas de milho aumentou aproximadamente na mesma proporção que a matéria seca, permitindo sugerir que o excesso de enxofre transportado por fluxo de massa tenha-se acumulado ou precipitado na superfície das raízes.

A precipitação de enxofre deve ocorrer, principalmente, na forma de sulfato de cálcio. Barber et al. (1963) publicaram uma auto-radiografia, mostrando o acúmulo de ³⁵S sobre uma raiz de milho. O acúmulo próximo à superfície das raízes, semelhante a uma contradifusão, indicaria a ocorrência de precipitação de sulfato de cálcio (Barber, 1984). Malzer & Barber (1975) demonstraram que o sulfato de cálcio pode precipitar-se perto das raízes, tanto nas plantas cultivadas no solo quanto nas cultivadas em solução nutritiva saturada com sulfato de cálcio. A solubilidade do sulfato de cálcio em água a 25°C é 15,4 mmol L⁻¹. Tal concentração pode ser facilmente atingida, quando

o fluxo de massa transporta cálcio e enxofre para a superfície das raízes, e a absorção de água é mais rápida que a de qualquer um desses elementos (Barber, 1984).

Nos solos PA e LA, o fluxo de massa apresentou incrementos cada vez maiores, em resposta às doses de S aplicadas, ajustados a equações quadráticas (Figura 1). Apesar de o efeito quadrático ser significativo somente a 20% de probabilidade no solo PA, essa tendência é confirmada pelo elevado valor do R^2 ajustado, de 0,996.

Nesses solos, tanto o fluxo de massa quanto a difusão participaram do transporte de enxofre, até que as quantidades supridas se igualassem às absorvidas pela planta (Figuras 1). A partir desse ponto, o fluxo de massa passou a suprir a totalidade de enxofre, e o excedente se acumulou e, ou, precipitou na superfície das raízes, à semelhança do que ocorreu no solo VI. As doses necessárias para atingir tal ponto foram estimadas em 60,4 e 41,1 mg dm^{-3} de S nos solos PA e LA, respectivamente. Substituindo esses valores nas equações de enxofre na solução do solo, em função das doses de S aplicadas (Quadro 3), foram obtidas as concentrações de enxofre na solução do solo necessárias para que a quantidade potencialmente transportada por fluxo de massa fosse igual àquela absorvida e acumulada pela planta.

Verifica-se que o processo de difusão participou do suprimento de enxofre às raízes, quando a concentração do nutriente estava abaixo de 15,0 e 13,9 mg L^{-1} na solução dos solos PA e LA, respectivamente.

Estabelecida a dose mínima necessária em cada solo, para atingir o ponto em que o enxofre absorvido pela planta passa a ser transportado exclusivamente por fluxo de massa, determinou-se a contribuição percentual do fluxo de massa e da difusão para o transporte de enxofre até as raízes abaixo desse valor de concentração. Como os dois mecanismos atuam de forma complementar até atingir tal ponto, foram analisados apenas os dados referentes ao fluxo de massa. A contribuição da difusão pode ser obtida, subtraindo-se de 100 a percentagem de enxofre transportado por fluxo de massa.

Ajustaram-se equações quadráticas nos dois solos (Figura 2). Na dose 0 mg dm^{-3} de S, o fluxo de massa transportou apenas 26,7 e 21,7% do enxofre absorvido pelas plantas, nos solos PA e LA, respectivamente.

Depreende-se que o transporte de enxofre para as raízes depende não somente do fluxo de massa, mas também da difusão, quando a concentração do nutriente na solução do solo estiver abaixo desses valores. O suprimento de outros nutrientes que podem ser transportados exclusivamente por fluxo de massa, quando existe uma concentração adequada no solo, também é complementado pelo processo de difusão, quando esses nutrientes estão em baixa concentração na solução do solo. Isso foi observado para nitrogênio (Liao & Bartholomew, 1974; Okajima & Taniyama, 1980; Strebel & Duynisveld, 1989), cálcio (Prenzel, 1979) e magnésio (Al-Abbas & Barber, 1964; Vargas et al., 1983).

Quadro 3. Equações de regressão para concentração de enxofre na solução do solo, em mg L^{-1} , em função das doses de S aplicadas, em mg dm^{-3} , em amostras dos solos de Viçosa, de Paracatu e de Lassance

Solo	Equação de regressão	R^2
Viçosa	$\hat{Y} = 23,74 + 0,4120^{**} S + 0,00135^+ S^2$	0,995
Paracatu	$\hat{Y} = 2,24 + 0,0970^* S + 0,00189^{**} S^2$	0,998
Lassance	$\hat{Y} = 2,95 + 0,1912^* S + 0,00184^{**} S^2$	0,996

⁺, ^{*} e ^{**}: significativo ao nível de 10, 5 e 1%, respectivamente.

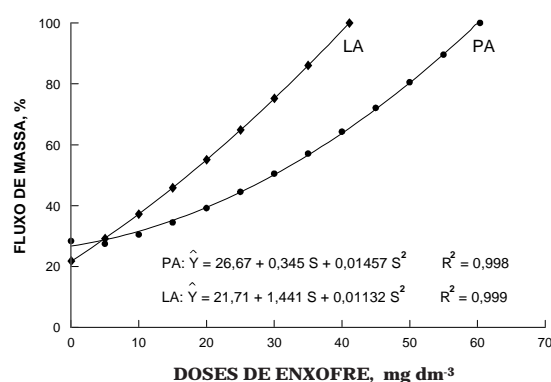


Figura 2. Contribuição percentual do fluxo de massa na absorção de enxofre por plantas de milho, em função das doses de S aplicadas em amostras dos solos de Paracatu (PA) e Lassance (LA).

CONCLUSÕES

1. O fluxo de massa foi o principal mecanismo de transporte de enxofre até a superfície radicular do milho.

2. Em alta concentração de enxofre na solução do solo, o fluxo de massa supriu quantidades de enxofre superiores às absorvidas pela planta.

3. A contribuição da difusão para o suprimento de enxofre ocorreu, apenas, em baixa concentração desse nutriente na solução do solo.

LITERATURA CITADA

- AL-ABBAS, H. & BARBER, S.A. Effects of root growth and mass-flow on the availability of soil calcium and magnesium to soybeans in a greenhouse experiment. *Soil Sci.*, 97:103-107, 1964.
- ALVAREZ V., V.H. Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1974. 125p. (Tese de Mestrado)

- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanist approach. New York, John Wiley, 1984. 398p.
- BARBER, S.A.; WALKER, J.M. & VASEY, E.H. Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *J. Agric. Food Chem.*, 11:204-207, 1963.
- BISSANI, C.A. Disponibilidade de enxofre para as plantas em solos do Rio Grande Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 198p. (Tese de Mestrado)
- BLANCHAR, R.W.; REHM, G. & CALDWELL, A.C. Sulfur in plant material by digestion with nitric and perchloric acid. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:71-72, 1965.
- CHESNIN, L. & YIEN, C.H. Turbidimetric determination of available sulfates. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 15:149-151, 1950.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 4ª aproximação. Lavras, 1989. 176p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- ENDE, J. van den. Extraction methods for the determination of major elements in greenhouse soils and potting and culture media. *Acta Hort.*, 29:125-139, 1973.
- GREGORY, P.J.; CRAWFORD, D.V. & MCGOWAN, M. Nutrient relations of winter wheat. 2. Movement of nutrients to the root and their uptake. *J. Agric. Sci.*, 93:495-504, 1979.
- JARRELL, W.M. & BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. *Adv. Agron.*, 34:197-224, 1981.
- LIAO, C.F.H. & BARTHOLOMEW, W.V. Relation between nitrate absorption and water transpiration by corn. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:472-477, 1974.
- MALZER, G.L. & BARBER, S.A. Precipitation of calcium and strontium sulfates around plant roots and its evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39:492-495, 1975.
- OKAJIMA, H. & TANIYAMA, I. Significance of mass flow in nitrate-nitrogen supply to plant roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26:363-374, 1980.
- OLIVER, S. & BARBER, S.A. An evaluation of the mechanisms governing the supply of Ca, Mg, K and Na to soybean roots (*Glycine max*). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:82-86, 1966.
- PATEL, C.L.; GHILYAL, B.P. & TOMAR, V.S. Nutrient flow rates in rice roots under varying drainage conditions. *Plant Soil*, 77:243-252, 1984.
- PRENZEL, J. Mass flow to the root system and mineral uptake of a beech stand calculated from 3-year field data. *Plant Soil*, 51:39-49, 1979.
- RUIZ, H.A. Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois latossolos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 86p. (Tese de Doutorado)
- STREBEL, O. & DUYNISVELD, W.H.M. Nitrogen supply to cereals and sugar beet by mass flow and diffusion on silty loam soil. *Z. Pflanzenernährung. Bodenk.* 152:135-141, 1989.
- VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J. & ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:143-148, 1983.