

Influência da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares, da acidez do solo e de fontes de fósforo no crescimento do milho

Telma Aparecida Costa¹, José Carlos Pintro², Eraldo Schunk Silva³ e Sandra Maria Gomes da Costa^{4*}

¹Universidade Paranaense, Campus de Toledo, Av. Parigot de Souza, 3636, 85906-090, Toledo, Paraná, Brasil. ²Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ³Departamento de Estatística, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ⁴Departamento de Biologia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: smgcosta@uem.br

RESUMO. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) exóticos, da acidez do solo e de fontes de fósforo no crescimento e na composição mineral de plantas de milho, *Zea mays* L. (Poaceae). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial (2x2x2), correspondendo a dois níveis de V% (21 e 60%), duas fontes de P ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), inoculado e não-inoculado com FMA, com cinco repetições. A inoculação proporcionou maiores concentrações de P, K e de Cu, nas folhas de milho, diminuindo os efeitos da acidez do solo em fonte solúvel de P. O solo corrigido favoreceu o crescimento radical, o aumento da concentração de Mg nas folhas, o aumento da matéria seca da parte aérea e a diminuição de Mn nas folhas. A combinação solo corrigido - P baixa solubilidade - FM autóctones demonstrou ser a mais propícia ao desenvolvimento do cultivar de milho utilizado.

Palavras-chave: solo ácido, calagem, fósforo, *Scutellospora pellucida*, *Scutellospora heterogama*, *Glomus diaphanum*, *Zea mays*.

ABSTRACT. The influence of the inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi, soil reaction, and phosphate fertilizers on the growth maize plants. The aim of this research was to evaluate the effect of the inoculation of exotic arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), soil reaction and P fertilizers on the growth and mineral composition of maize plants, *Zea mays* L. (Poaceae). The experiment was carried out in an acid soil (Dark Red Oxisol), using random blocks in outline factorial (2x2x2), corresponding to two levels of V% (21 and 60%), two sources of P ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ and $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), and AMF inoculated and not AMF inoculated, with five replicates. The AMF inoculation, in acid soil, provided, in the maize leaves, larger concentrations of P, K and of Cu, decreasing the effects of the acidity of the soil, in soluble source of P. The soil correction promoted the largest values of radical length, Mg concentration in the leaves and of aerial dry matter and decreased Mn content. The combination of soil correction - P low solubility - AMF autochthonous demonstrated to be most propitious to the development of used maize cultivar.

Key words: acid soil, liming, phosphorus, *Scutellospora pellucida*, *S. heterogama*, *Glomus diaphanum*, *Zea mays*.

Introdução

Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são microrganismos que formam associações simbiotróficas mutualistas (micorrizas arbusculares - MA) com as raízes de vegetais, as quais ocorrem normalmente na natureza.

Uma das vantagens da colonização micorrízica ocorre devido ao aumento da absorção de nutrientes pelas plantas, especialmente dos elementos de baixa mobilidade no solo, como é o caso do fósforo (P),

levando ao maior crescimento e produtividade da planta (Clark, 1997). A alta eficiência das hifas na absorção de P deve-se ao seu menor diâmetro, à maior superfície de contato hifa-solo e também à capacidade de estocar polifosfatos nos vacúolos (Marschener, 1997).

O efeito direto da acidez do solo sobre o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais manifesta-se por meio da toxidez do alumínio (Al) e/ou do manganês (Mn), constituindo-se em um dos problemas sérios dos solos tropicais. Em solos excessivamente ácidos, o desenvolvimento das

plantas é prejudicado pela indisponibilidade de nutrientes essenciais, como fósforo, zinco e ferro que, em geral, complexam-se com substâncias orgânicas ou com outros elementos minerais (Habte, 1995). Nessas condições, o crescimento das raízes e da parte aérea é reduzido e a quantidade elevada de Al trocável, no solo, atua no sistema radical das plantas modificando sua anatomia, sugerindo que a concentração deste elemento limita a habilidade das raízes em absorver muitos dos outros nutrientes (Yang et al., 1996). As células de raízes afetadas pelo Al podem sofrer alterações citológicas, ocasionando paralisação no seu crescimento, pois este mineral interfere no processo de divisão celular principalmente na replicação do DNA (Minocha et al., 1992).

A presença de maiores teores de Al e P na raiz da maioria das plantas micorrizadas indica redução da translocação do Al para a parte aérea e o uso do P para sua neutralização na raiz, sugerindo que as MA podem atuar como um mecanismo de defesa para as plantas em solos onde o Al atinge níveis tóxicos (Silva e Miranda, 1994).

Uma das práticas mais comuns e mais utilizadas para a correção da acidez do solo é a calagem (Nurlaeny et al., 1996), porém alguns autores sugerem que essa prática afeta significativamente a simbiose micorrízica, diminuindo a colonização e a diversidade de FMA, provavelmente porque tal processo promove melhoria do estado nutricional da planta (Rubio et al., 1992).

Tendo em vista que a acidez é um problema sério dos solos tropicais, este trabalho teve como objetivo estudar a influência da inoculação de FMA e da correção da acidez do solo sobre o crescimento do milho, *Zea mays* L. (Poaceae), em solo fertilizado com duas fontes de P, uma solúvel e outra pouco solúvel.

Material e métodos

O solo, coletado na camada de 0-20cm de profundidade, classifica-se como LATOSSOLO VERMELHO Escuro de procedência do arenito Caiuá, Cianorte, Estado do Paraná. O solo não foi esterilizado com a intenção de deixá-lo o mais próximo das condições naturais de cultivo. Após secagem, homogeneização e tamisação, retirou-se uma amostra de solo para análise química (Embrapa, 1979), o qual apresentou as seguintes características: pH CaCl_2 =3,9; $[\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}] = 4,54$; $\text{Al}^{3+} = 0,90$; $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} = 1,12$; $\text{Ca}^{2+} = 0,77$; $\text{K}^+ = 0,07$; soma de bases (S)=1,19; capacidade de troca de cátions (T)=5,53 ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$), saturação por base (V%)=21; saturação de Al%= 43; P=4 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Incubou-se o solo, sob condições controladas em

casa de vegetação, com CaCO_3 e MgCO_3 . Kg^{-1} de solo, na relação 3:1, durante 30 dias, objetivando elevar o valor de V para 60%. Empregaram-se duas fontes de P ($150 \text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de solo): Na_2HPO_4 (solúvel) e $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (baixa solubilidade). Acrescentaram-se, em uma única vez no início do experimento, na forma de solução nutritiva, nutrientes ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ de solo) nas respectivas concentrações: 300 N; 150K; 57 S; 0,8 B; 1,33Cu; 1,55Fe; 3,66 Mn; 4,0 Zn e 0,15 Mo.

As sementes da cultivar de milho, obtidas por polinização controlada entre o híbrido simples [F1: L922 (tolerante) e Ast214 (sensível)], foram fornecidas pelo Laboratório de Genética, UEM, Maringá, Estado do Paraná. Este cultivar foi escolhido devido à sua homogeneidade genética.

O inóculo de FMA constituiu-se da mistura de 120 esporos de três espécies, sendo 40 esporos de cada espécie: *Scutellospora heterogama* (Nicol. e Schenck) Walker e Sanders, *S. pellucida* (Nicol. e Schenck) Walker e Sanders e *Glomus diaphanum* Morton e Walker, provenientes do Laboratório de Microbiologia do Solo do Instituto Agronômico do Paraná (Iapar), Londrina, Estado do Paraná.

Em cada vaso (6,3 kg de solo) semearam-se seis sementes de milho e adicionou-se um mililitro de água contendo 120 esporos de FMA na cova de cada semente, nos tratamentos com inoculação, totalizando 720 esporos por vaso. Após a emergência das plântulas, fez-se o desbaste, cultivando-se duas plantas em cada vaso. Manteve-se, durante a condução experimental de 60 dias em casa de vegetação, a umidade do solo em torno de 80% da capacidade do campo.

O delineamento experimental constituiu-se de um esquema fatorial 2 valores de % (21 e 60%), 2 fontes de P (solúvel - $\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4$, e pouco solúvel - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) e 2 interações biológica (inoculado e não-inoculado com FMA).

A separação dos esporos fez-se pelas técnicas propostas por Gerdemann e Nicolson (1963) e Jenkins (1963). Em lâminas permanentes (Morton et al., 1993), os esporos foram quantificados e identificados pelo manual de Schenck e Pérez (1988) e pelo banco de dados do Invam. Na avaliação da colonização MA empregaram-se a técnica de coloração de Koske e Gema (1989) e o método de Giovannetti e Mosse (1980).

Determinaram-se o peso da matéria seca (estufa a 65°C , com circulação de ar forçado durante 72h), o comprimento radical (trena), a concentração de nutrientes nas folhas de milho e foram realizadas análises químicas do solo após o período experimental. Após a digestão nitroperclórica das

amostras das folhas (Malavolta *et al.*, 1997), realizaram-se as determinações analíticas processadas por espectrofotometria de absorção atômica (Ca, Mg, Fe, Cu, Zn e Mn); fotometria de chama (K); espectrofotometria colorimétrica (P) e método semi-micro-Kjeldahl (N) (Malavolta *et al.*, 1997). Os dados, exceto os da qualificação e da quantificação das espécies de FMA, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do Teste de Comparações Múltiplas de Tukey.

Resultados

Inicialmente, extraíram-se esporos e identificaram-se seis espécies de FMA autóctones do solo: *Acaulospora longula* Spain e Schenck, *A. scrobiculata* Trappe, *Entrophospora colombiana* Spain e Schenck, *Glomus etunicatum* Becker e Gerdemann., *G. macrocarpum* Tul e Tul, *Scutellospora* sp. Todas as espécies apareceram em número muito baixo, sendo *E. colombiana* e *G. macrocarpum* as mais representativas. *Glomus geosporum* Nicolson e Gerdemann, espécie autóctone, ocorreu também em baixo número somente após a condução do experimento no solo de alguns tratamentos (Tabela 1).

Os tratamentos não-inoculados não apresentaram as espécies inoculadas, demonstrando eficiente controle das condições experimentais. Em todos os tratamentos o número de esporos separados do solo foi baixo.

O tempo de condução do experimento permitiu a germinação dos esporos autóctones e inoculados, pois verificou-se colonização MA, não sendo, no entanto, suficiente para que ocorresse a multiplicação dos FMA, já que poucos esporos das espécies inoculadas foram recuperados (Tabela 1).

Na análise dos resultados deve-se levar em consideração que o solo não foi esterilizado como usualmente se faz em trabalhos dessa natureza, apresentando FMA autóctones ativos, verificados

pela colonização MA nos tratamentos não-inoculados (Tabela 2).

No tratamento com solo não-corrigido e adição P pouco solúvel, os FMA autóctones demonstraram adaptabilidade às condições edáficas, pois, apesar da baixa percentagem de colonização MA, obteve-se valor de peso de matéria seca igual ao tratamento com fonte solúvel de P e inoculação com FMA (Tabela 2).

Observou-se que no solo corrigido e P pouco solúvel, novamente os FMA autóctones responderam favoravelmente às condições edáficas, proporcionando aumento do peso de matéria seca e não diferindo do tratamento onde se fez a inoculação. Ocorreu interação significativa entre correção do solo e a fonte de P, onde P pouco solúvel favoreceu o aumento da matéria seca, independentemente da inoculação. Por outro lado, houve interação entre inoculação e fonte de P, onde o P solúvel e a inoculação diminuíram a matéria seca total.

Nos solos corrigidos, a fonte de P pouco solúvel, estimulou a colonização dos FMA exóticos e a solúvel inibiu, mas a fonte de P não interferiu na colonização dos FMA autóctones. Já, em solos não-corrigidos, a fonte solúvel de P estimulou a colonização tanto dos FMA autóctones quanto dos exóticos (Tabela 2).

Em condições de solo não-corrigido, embora o P solúvel favoreça a colonização MA e acarrete maiores concentrações de P nas folhas, especialmente no tratamento inoculado, este fato não correspondeu ao maior valor de matéria seca (Tabelas 2 e 3). Os maiores valores de matéria seca verificaram-se nos solos corrigidos e com fonte de P pouco solúvel. No entanto, se somente a calagem levasse a estes resultados, os mesmos não difeririam daqueles obtidos nos tratamentos com solo corrigido e fonte solúvel de P. Na realidade, a fonte de P solúvel proporcionou maior concentração de P nas folhas, mas não conduziu ao maior crescimento vegetal

Tabela 1. Número de esporos das espécies de FMA/50mL de solo encontrado no solo natural, sem e com inoculação com FMA exóticos, nos diferentes tratamentos. Número médio e desvio padrão de cinco repetições

Espécies De FMA	Solo sem correção				Solo corrigido				
	Solo Natural	P solúvel		P pouco solúvel		P solúvel		P pouco solúvel	
		- Inoc	+ Inoc	- Inoc	+ Inoc	- Inoc	+ Inoc	- Inoc	+ Inoc
<i>Acaulospora longula</i>	0,3±0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>A. scrobiculata</i>	0,3±0,6	-	2,4±2,6	2,0 ± 2,4	1,8±2,9	0,7±0,6	1,2 ± 1,6	-	1,6±2,1
<i>Entrophospora colombiana</i>	4,3±3,5	2,0±2,0	6,8±3,7	9,0 ± 17,3	5,3±7,3	2,3±3,2	2,0 ± 1,0	2,0±0,0	2,6±2,5
<i>Glomus diaphanum*</i>	-	-	1,0±1,0	-	1,3±1,0	-	0,6 ± 1,3	-	0,6±0,6
<i>G. etunicatum</i>	0,7±1,2	0,3±0,5	2,6±1,8	1,6 ± 1,5	2,3±2,6	0,3±0,6	0,8 ± 1,3	0,7±0,6	6,6±4,0
<i>G. geosporum</i>	-	1,0±0,0	-	0,2 ± 0,5	0,5±0,6	-	-	0,3±0,6	0,4±0,6
<i>G. macrocarpum</i>	6,7±6,4	3,0±2,0	4,0±2,9	7,6 ± 6,6	0,8±5,0	2,3±3,2	1,8 ± 1,6	0,3±0,6	5,4±6,3
<i>Scutellospora sp</i>	0,7±1,2	0,3±0,5	-	0,8 ± 1,1	0,3±0,5	-	-	0,7±1,2	-
<i>S. pellucida*</i>	-	-	0,2±0,5	-	0,3±0,5	-	0,4 ± 0,6	-	0,4±0,9
<i>S. heterogama*</i>	-	-	0,4±0,6	-	1,3±1,9	-	12 ± 13,7	-	2,8±1,9

* Espécies de FMA exóticas inoculadas

Tabela 2. Matéria seca da folha (MS F); matéria seca da parte aérea (MS PA); comprimento de raiz (CR); matéria seca de raiz (MS R) e colonização micorrízica arbuscular (CMA) de plantas de milho

Variáveis	Solo sem correção				Solo corrigido			
	P pouco solúvel		P solúvel		P pouco solúvel		P solúvel	
	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc
MS F (g)	43,8 bc	36,3 c	38,9 bc	43,2 bc	54,8 a	54,1 a	45,2 b	45,7 b
MS PA(g)	85,3 bc	68,1 c	71,9 c	82,3 bc	105,6 a	106,7 a	90,9 ab	86,3bc
MS R (g)	27,9 ab	19,5 abc	14,9 c	31,4 a	21,9abc	25,6abc	17,3abc	15,8bc
CR (cm)	57,0 bc	51,0 bc	51,8 bc	54,5 bc	77,0 a	67,4 ab	40,3 c	41,1 c
CMA (%)	9,8 c	21,0 c	12,4 d	24,6 b	9,0 c	40,4 a	9,4 c	24,2bc

As médias seguidas pela mesma letra, na horizontal, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5%

Tabela 3. Teores dos nutrientes nas Análise mineral das folhas de milho nos diferentes tratamentos. Média de Teor médio de cinco repetições

Nutrientes	Solo sem correção				Solo corrigido			
	P pouco solúvel		P solúvel		P pouco solúvel		P solúvel	
	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc
Ca (g/kg)	8,4 a	7,3 ab	4,5 de	5,0 cd	6,3 bc	5,6 cd	3,1 ef	2,6 f
Mg (g/kg)	2,9 bc	2,0 c	3,1 b	3,8 b	6,4 a	5,9 a	3,8 b	3,8 b
P (g/kg)	3,7 cd	3,7 cd	5,0 b	5,8 a	2,0 e	1,9 c	4,2 cd	4,4 c
K (g/kg)	6,8 c	9,0 ab	8,2 bc	6,8 c	7,0 c	7,7 bc	10,5 a	9,4 ab
N (g/kg)	20,4cd	22,4abc	22,4abc	21,6bcd	19,6 d	22,8abc	25,0 a	23,6 a
Cu (mg/kg)	4,1 c	5,2 a	4,7 b	5,0 ab	3,2 d	3,3 d	4,1 c	4,0 c
Zn (mg/kg)	44,7 a	32,8 ab	46,3 a	36,2 ab	25,0 b	33,4 ab	25,8 b	27,6 b
Fe (mg/kg)	79,9 a	90,6 a	125,6 a	77,6 a	103,3a	110,0a	99,0 a	107,6'
Mn	511,0 a	386,0 b	354,3 b	331,4 b	59,8 c	55,0 c	45,6 c	45,1 c

As médias seguidas pela mesma letra, na horizontal, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5%; As médias seguidas pela mesma letra, na horizontal, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5%

A análise mineral das folhas de milho revelou, em relação à concentração dos macronutrientes, que a correção do solo aumentou as concentrações de Mg, na fonte de P pouco solúvel, de K e de N, na fonte solúvel de P. Quanto à inoculação de FMA, os aumentos mais pronunciados em suas concentrações, foram o P, na fonte solúvel de P, e o K e N, na fonte de P pouco solúvel, independentemente da correção do solo. Já as maiores concentrações de Ca foram observadas nos tratamentos com P pouco solúvel, solo não-corrigido e apenas com FMA autóctones (Tabela 3).

Ocorreram interações significativas entre correção do solo e fontes de P, para o Mg (P pouco solúvel, e K (P solúvel); fonte P e inoculação, na presença do P pouco solúvel para o K e N.

Em relação aos micronutrientes, as maiores concentrações foram verificadas quando o milho foi cultivado em solos não-corrigidos, sendo que a inoculação com FMA promoveu aumentos na concentração de Cu e diminuição na de Zn. As concentrações de Mn, como o esperado, diminuíram drasticamente com a correção do solo. Observou-se também que, em condição de solo não-corrigido e

fonte de P pouco solúvel, a inoculação com FMA promoveu diminuição da concentração deste elemento.

Houve interação significativa entre correção do solo e fonte de P pouco solúvel, para o Mn; correção do solo e inoculação com FMA, para Zn. A concentração de Cu apresentou as seguintes interações: solo corrigido e P solúvel, solo não-corrigido e inoculação com FMA e fonte solúvel de P e inoculação, em solo corrigido.

A análise química do solo revelou que os tratamentos com solo corrigido apresentaram valores superiores de pH, os quais foram significativamente diferentes em relação aos tratamentos sem correção (Tabela 4). Para a variável Ca^{2+} , os tratamentos com solo corrigido e fósforo insolúvel apresentaram maior concentração deste elemento. Nos solos corrigidos não foi constatada presença de Al trocável, demonstrando que a calagem foi eficiente. Não foi constatada diferença significativa na concentração de P no solo entre os tratamentos, apesar de terem sido utilizados fontes diferentes de P (solúvel e pouco solúvel). No entanto, observou-se menor teor de P no tratamento inoculado com FMA e P solúvel.

Tabela 4. Análise química do solo submetido aos diferentes tratamentos após a condução do experimento. pH ($CaCl_2$); [$H^+ + Al^{3+}$; Al^{3+} ; $Ca^{2+} + Mg^{2+}$; Ca^{2+} ; K^+ (cmol, dm^{-3})] e P (mg dm^{-3}). Média Valor médio de cinco repetições

Variáveis	Solo sem correção				Solo corrigido			
	P pouco solúvel		P solúvel		P pouco solúvel		P solúvel	
	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc	-Inoc	+Inoc
pH	4,4 c	4,3 c	4,3 c	4,4 c	5,7 b	5,7 b	6,1 a	6,3 a
Ca^{2+}	2,2 c	2,2 c	1,7 d	1,7 d	3,1 a	3,1 a	2,7 b	2,7 b
$Ca^{2+} + Mg^{2+}$	2,6 b	2,6 bc	2,3 c	2,3 c	5,0 a	5,1 a	4,9 a	4,8 a
K^+	0,068 a	0,09 a	0,082 a	0,068 a	0,070 a	0,077 a	0,105 a	0,094 a
$H^+ + Al^{3+}$	4,5 a	4,1 b	4,7 a	4,4 ab	2,6 c	2,6 c	2,5 c	2,4 c
Al^{3+}	0,4 a	0,4 a	0,5 a	0,5 a	0,0	0,0	0,0	0,0
P	205 a	184 a	157 a	142 a	209 a	168 a	155 a	153 a

As médias seguidas pela mesma letra, na horizontal, não diferem entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5%

Apesar do tratamento solo não-corrigido, P solúvel e inoculado com FMA não apresentar os maiores valores de colonização micorrízica e ainda apresentar valores altos de Al no solo, este tratamento apresentou as maiores concentrações de P nas folhas de milho e maiores valores de matéria seca das raízes do milho.

Discussão

Em todos os tratamentos o número de esporos de FMA foi baixo com distribuição desigual, demonstrada pelo alto desvio padrão observado. Resultados da distribuição não-uniforme dos esporos de FMA no solo foram registrados por

diversos pesquisadores (Gomes-da-Costa, 1992; Carrenho, 1998).

Ressalta-se que nos tratamentos inoculados as médias da porcentagem de colonização MA foram maiores e representam a somatória da efetividade dos FMA nativos e exóticos. Estes resultados discordam dos encontrados por O'Donnell *et al.* (1992), onde a inoculação com FMA não afetou a porcentagem de colonização das raízes.

A maior porcentagem de colonização MA, ocorreu no tratamento inoculado na presença de P pouco solúvel e solo calcareado. Resultados semelhantes, em relação à fonte de P, foram encontrados por Tawarayama *et al.* (1994), que observaram diminuição na porcentagem de colonização nas raízes de trevo branco com a adição de superfosfato (P solúvel). Em citros, a porcentagem de colonização foi 52% maior na presença de fosfato de rocha (P pouco solúvel), quando comparada com os tratamentos onde havia presença de superfosfato (Costa e Paulino, 1990). Em *Paspalum notatum* houve intensa colonização micorrízica no córtex radical em solos com baixa concentração de P (Rheinheimer e Kaminski, 1995).

A elevada concentração de P disponível tem sido negativamente correlacionada com a atividade MA (Hayman, 1987). Similarmente, disponibilidade muito baixa de P pode inibir a colonização, de modo que pequenas adições favorecem a colonização radical (Bolan *et al.*, 1984). Este fato foi também observado neste trabalho.

Os FMA aumentam a eficiência na utilização de várias formas de P mineral (Young *et al.*, 1986). Em citros a colonização micorrízica aumentou 29,8% a atividade da fosfatase ácida nos tratamentos com P pouco solúvel, indicando que os FMA aumentaram a absorção de P pouco solúvel (Tang e He, 1991). A eficiência na utilização de P por plantas micorrizadas depende da espécie do fungo e principalmente do solo onde as plantas são cultivadas (Young *et al.*, 1986).

Em relação ao crescimento das raízes, os resultados obtidos sugerem que a correção do solo juntamente com a adição de P pouco solúvel proporcionaram maior crescimento das raízes do milho, independentemente da inoculação com FMA. Tais resultados estão em concordância com os obtidos por Mascarenhas e Tanaka (1995) que, trabalhando com uma variedade de trigo sensível ao Al, observaram aumento no sistema radical e diminuição no teor de Al devido à correção do solo.

Os resultados mostraram que, para a variável matéria seca da raiz, a inoculação proporcionou aumento da mesma em solo ácido e P solúvel. Clark

(1997) obteve resultados semelhantes em uma variedade de trigo tolerante ao Al, colonizado por FMA nativos e Lambais e Cardoso (1990), em leguminosas tropicais e gramíneas, cultivadas sob condições de altas doses de P.

A interferência da correção do solo no aumento da produção de matéria seca também foi observada por Silva e Miranda (1994). Considerando a inoculação de espécies exóticas de FMA, os resultados discordam dos obtidos por Miranda (1982), no seu trabalho com soja, onde observou aumento da matéria seca. Ainda, Russomanno (1996), em milho, não obteve diferenças na matéria seca da parte aérea entre plantas inoculadas e não-inoculadas. Uma explicação para o aumento da matéria seca é a maior absorção de P, via MA (Nurlaeny *et al.*, 1996).

Apesar de a simbiose MA ser considerada mutualista por muitos pesquisadores parece existir diferentes respostas da planta à colonização e esta pode ser positiva, neutra ou até mesmo negativa. Tais respostas variam em função de fatores relacionados às condições edafoclimáticas, ao micossimbionte, ao fitossimbionte e às interações estabelecidas na simbiose (Smith e Smith, 1996).

Tem sido verificado também que nem sempre o endófito que se mostra mais eficiente em promover o crescimento, produção, absorção de nutrientes, nodulação e fixação de nitrogênio apresenta maior colonização das raízes (Miranda, 1982).

Os resultados encontrados mostram que a inoculação com FMA promoveu maiores concentrações de P, K e Cu nas folhas de milho, em condições de solo não-corrigido. Resultados semelhantes foram obtidos por Lambais e Cardoso (1993), Medeiros (1994) e Clark (1997) em trabalhos com forrageiras tropicais, sorgo, milho, dentre outras. Esses mesmos autores observaram também aumento nas concentrações Ca, Mg, Mn e Fe com a inoculação de diferentes espécies de FMA, resultados esses em desacordo com os observados neste estudo.

Santos (1998), trabalhando com a inoculação de FMA em gramíneas e leguminosas, observou incrementos no acúmulo de P. No entanto, as variações na concentração do P foram dependentes da espécie de FMA, para mucuna cinza, enquanto que para as demais plantas a qualidade do inóculo não interferiu, concluindo que a capacidade de absorver mais ou menos P é uma característica genética específica de cada planta.

Os resultados obtidos no presente trabalho ainda estão em concordância com os de Eranna e Parama (1994), onde a inoculação de FMA proporcionou

aumento na absorção de P em condições ácidas. A inoculação com FMA aumenta a eficiência dos fertilizantes fosfatados em plantas cultivadas em solos ácidos e a associação micorrízica é importante para a planta tolerar níveis tóxicos de Al no solo (Lambais e Cardoso, 1990). Em plantas crescendo em solos ácidos a inoculação com FMA aumentou a eficiência no uso dos fertilizantes fosfatados, fosfato de rocha e superfosfato, aparentemente houve maior eficiência no uso do fosfato de rocha quando comparado com superfosfato (Blal et al., 1990).

A interação entre FMA e P em muitos vegetais importantes agronomicamente tem sido amplamente investigada (Raju et al. 1990; Silva e Siqueira, 1991; Weber e Amorim, 1994), todos eles verificando maior absorção de P.

É fato que com a maior disponibilidade de nutrientes, as plantas necessitam menos de MA e tendem a não aceitar, ou a não facilitar o desenvolvimento dos FMA, para que não haja competição por fotoassimilados entre os simbioses (Graham e Eissenstat, 1994).

As concentrações ideais dos macronutrientes nos vegetais dependerá da espécie, da variedade e/ou cultivar e das condições edáficas. Uma variedade de milho, medianamente tolerante à acidez, pode não necessitar de nenhuma correção do solo e beneficiar-se da inoculação de FMA autóctones para obter concentrações necessárias ao seu desenvolvimento.

Os resultados obtidos, neste trabalho da análise química do solo corrigido estão em concordância com os obtidos por Quaggio (1986). Resultados semelhantes ao do presente estudo foram encontrados por Russomanno (1996), onde a inoculação com FMA não promoveu alterações significativas no valor do pH e nos teores de Al, K, Ca e de P no solo cultivado com milho. No entanto, o solo inoculado apresentou maior quantidade de P, diferindo do encontrado neste estudo.

A hipótese mais provável para justificar a ausência de diferenças significativas no teor de P no solo dos tratamentos parece estar ligada à natureza ácida do extrator - MEHLICH- 1 (Embrapa, 1979), utilizado na determinação do P. Os extratores deste tipo, em uso na maior parte dos laboratórios de solos, extraem mais P ligado ao Ca e apenas parte do P ligado aos óxidos e hidróxidos de Fe e de Al. Em vista disso, é possível superestimar a disponibilidade de P em solos que receberam de alguma forma de P natural (P ligado ao Ca), como ficou evidenciado no presente estudo.

A maior disponibilidade de um nutriente às plantas, aferida por um extrator químico, pode não ter

correlação com a biodisponibilidade deste mesmo nutriente. A prova disso é que se não foi constatada diferença significativa entre os tratamentos para o P no solo. O mesmo deveria ocorrer para a concentração deste elemento na folha e na produção de matéria seca. No entanto verificou-se diferença significativa no teor de P nestas variáveis.

Os principais objetivos das pesquisas na área de eficiência micorrízica visam a inoculação artificial em áreas agrícolas, na tentativa de substituir a população autóctone por outra mais eficiente. Contudo, o sistema solo-planta está sujeito a grandes variações, causando interações complexas e exigindo que cada situação específica seja analisada, de forma a obter o máximo de desempenho da simbiose.

O conhecimento atual dos FMA permite fazer generalizações amplas sobre os tipos, organismos, mecanismos de formação, anatomia e função da simbiose, mas as maneiras pelas quais as micorrizas afetam espécies de plantas e a dinâmica das comunidades, e seu uso, em larga escala, na produção agrícola e na conservação ambiental são grandes desafios. Mesmo que a avaliação das reais funções e atribuições das micorrizas no ecossistema não possam ser determinadas com segurança, o interesse pelos fungos micorrízicos arbusculares atingiu um nível tal que qualquer discussão sobre a produção e biotecnologia agrícola que não considere esta simbiose é incompleta.

Nesse estudo, a combinação correção-P pouco solúvel-FMA autóctones parece ser a mais propícia ao desenvolvimento do cultivar de milho utilizado, tornando desnecessária a inoculação com FMA exóticos, já que o solo sem correção-P pouco solúvel-FMA autóctones permitiu teores suficientes de nutrientes e conduziu à mesma quantidade de matéria seca ao obtido no tratamento com correção-P solúvel-com inoculação. No entanto, seria conveniente, via manejo, proporcionar aumento no potencial de inóculo de FMA autóctones ou sua inoculação a fim de se obter maior eficiência dessa simbiose e, conseqüente diminuição do uso de insumos.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pela concessão da bolsa de estudo, nível mestrado, à primeira autora.

Referências

BLAL, B et al. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on phosphate fertilizer efficiency in two tropical acid soils planted with micropropagated oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Biol. Fertil. Soils*, Berlin, v.9, n.43-48, 1990.

- BOLAN, N. S. *et al.* Increasing phosphorus supply can increase the infection of plant roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.*, Kidlington, v.16, p.419-420, 1984.
- CARRENHO, R. *Influência de diferentes espécies de plantas hospedeiras e fatores edáficos no desenvolvimento de fungos micorrízicos arbusculares (FMA)*. 1998. Tese (Doutorado). Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 1998.
- CLARK, R.B. Arbuscular mycorrhizal adaptation, spore germination, root colonization, and host plant growth and mineral acquisition at low pH. *Plant Soil*, Dordrecht, v.192, p. 15-22, 1997.
- COSTA, N. D. L.; PAULINO, V.T. Response of leucaena to vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus fertilization. *Leucaena-Research-Reports*, v.11, p.42-44, 1990.
- EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro, SNLCS, 1979.
- ERANNA, A.; PARAMA, V.R.R. Effect of liming, mycorrhizal inoculation and rock phosphate on phosphorus uptake and growth of soybean in an acid soil. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, Karnataka, v.28, n.4, p.292-296, 1994.
- GERDEMANN, J.W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogene extracted from soil by wet sieving and decating. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, London, v.46, p.235-244, 1963.
- GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.*, Oxford, v.84, p.489-500, 1980.
- GOMES-DA-COSTA, S.M. *Fungos micorrízicos arbusculares em monoculturas e rotações de milho (Zea mays L.) e soja (Glycine max(L.) Merrill)*. 1992. Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 1992.
- GRAHAM, J.H.; EISSENSTAT, D.M. Host genotype and the formation and function of VA mycorrhizae. *Plant Soil*, Dordrecht, v.159, p.179-185, 1994.
- HABTE, M. Soil acidity as a constraint to the application of vesicular-arbuscular mycorrhizal technology. In: VARMA, A.; HOCK, B. (Ed.). *Mycorrhiza - structure, function, molecular biology and biotechnology*, Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 1995. p.593-605.
- HAYMAN, D.S.V. A mycorrhizas in field crop systems. In: SAFIR, G.R. (Ed.). *Ecophysiology of VA mycorrhizal plants*. Boca Raton: CRC Press, 1987. p.171-192.
- JENKINS, W.R. A rapid centrifugal-flootation technique for separating nematodes from soil. *Plant Dis. Rep.*, St Paul, v.48, p.692, 1963.
- KOSKE, R.E.; GEMMA, J.N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycol. Res.*, Cambridge, v. 92, n.4, p.486-505, 1989.
- LAMBAIS, M.R.; CARDOSO, E.J.B.N. Response of *Stylosanthes guianensis* to endomycorrhizal inoculation as affected by lime and phosphorus applications. I. Plant growth and development. *Plant Soil*, Dordrecht, v.29, n.2, p.283-289, 1990.
- LAMBAIS, M.R.; CARDOSO, E.J.B.N. Response of *Stylosanthes guianensis* to endomycorrhizal fungi inoculation as affected by phosphorus applications. *Plant Soil*, Dordrecht, v.150, n. 109-116, 1993.
- MALAVOLTA, E. *et al.* *Avaliação do Estado Nutricional das Plantas - princípios e aplicações*. Piracicaba: Patafós, 1997.
- MARSCHENER, H. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Hohenheim: Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim, 1997.
- MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T. Crescimento em vasos, de cultivares de soja e de trigo em função da saturação de alumínio. *Sci. Agric.*, Piracicaba, v.52, p.257-262, 1995.
- MEDEIROS C.A.B. *et al.* Effects of excess aluminium on mineral uptake in mycorrhizal sorghum. *J. Plant Nutr.*, Monticello, v.17, p.1399-1416, 1994.
- MINOCHA, R. *et al.* Effects of aluminum on DNA synthesis, cellular polyamine, polyamine biosynthetic enzymes and inorganic ions in cell suspension cultures of a woody plant. *Catharauthus roseus*. *Plant Physiol.*, Bethesda, v.85, p.417-424, 1992.
- MIRANDA, J.C.C. de. Influência de fungos endomicorrízicos inoculados a campo, na cultura de sorgo e soja em um solo sob cerrado. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.6, p.19-23, 1982.
- NURLAENY, N. *et al.* Effects of liming and mycorrhizal colonization on soil phosphate depletion and phosphate uptake by maize (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) grown in two tropical acid soils. *Plant Soil*, Dordrecht, v.181, p.275-285, 1996.
- O'DONNELL, J.J. *et al.* Inoculation of *Vigna parkeri* with mycorrhizal fungi in an acid Florida spodosol. *Trop. Grassl.*, St Lucia, v.26, p.120-129, 1992.
- QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle. In: DECHEN, A.R.; CARMELLO, O.A.C. (Ed.). *SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO*, 1986, Campinas. *Anais...* Campinas: Fundação Cargill, p.53-89.
- RAJU, P.S. *et al.* Benefit and cost analysis and phosphorus efficiency of VA mycorrhizal fungi colonizations with shorgum (*Sorghum bicolor*) genotypes grown at varied phosphorus levels. *Plant Soil*, Dordrecht, v. 24, p.199-204, 1990.
- RHEINHEIMER, D. *et al.* Intensidade de colonização de córtex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim-pensacola. *Cienc. Rural*, Santa Maria, v.25, n.2, p.223-228, 1995.
- RUBIO, H.S. *et al.* Efecto del encalado sobre algunos parametros biológicos e rendimento de trebal rosado (*Trifolium pratense* L.) en un suelo con alto contenido de aluminio. *Agric. Tec.*, Santiago, v.52, n.4, p.394-397, 1992.
- RUSSOMANNO, O.M.R. *Avaliação de diversas gramíneas na produção de inóculo de Glomus etunicatum* Becker e Gerdemann. 1996, Dissertação (Mestrado) - Faculdade de

Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, SP, 1996.

SANTOS, A.L. *Efeitos do estabelecimento de Gigaspora margarita e Glomus clarum por gramíneas e leguminosas sobre a esporulação de fungos micorrízicos arbusculares indígenas*. 1998. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1996.

SCHENCK, N.C.; PEREZ, Y. *Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi*. Gainesville: IVAM, 1988.

SILVA, H.J.B.; MIRANDA, J.C.C. Efeito da micorriza vesículo-arbuscular no crescimento de variedades de trigo sensível e tolerante ao alumínio, em solo de cerrado. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.18, p.407-414, 1994.

SILVA, L. F.C.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e teores de nutrientes de mudas e abacateiro, mangueira e mamoeiro sob influência de diferentes espécies de fungos micorrízicos vesículo-arbusculares. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.15, p.283-288, 1991.

SMITH, F.A.; SMITH S.E. Mutualism and parasitism: biodiversity in function and structure in the "arbuscular" (VA) mycorrhizal symbiosis. *Adv. Bot. Res.*, v.22, p.1-43, 1996.

TANG, Z.Y.; HE, S.L. The mechanism of phosphorus uptake from insoluble phosphate by citrus trees with mycorrhiza: 1. Effect of phosphatase activity on phosphorus uptake of citrus seedling with VA mycorrhiza. *China-Citrus*, Zhongguo Ganju, v.20, n.2, p.7-10, 1991.

TAWARAYA, K. et al. Effect of phosphorus application on the contents of amino acids and reducing sugars in the rhizosphere and Vamycorrhizal infection on white clover. *Soil Sci. Plant Nutr.*, Tokyo, v.40, n.3, p.539-543, 1994.

WEBER, O.B.; AMORIM, S.M.C. Adubação fosfática e inoculação de fungos micorrízicos vesículo-arbusculares em mamoeiro "solo". *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.18, p.187-191, 1994.

YANG, W.Q. The effect of aluminium and media the growth of mycorrhizal and nonmycorrhizal highbush blueberry plantlets. *Plant Soil*, Dordrecht, v.183, p.301-308, 1996.

YOUNG, C.C. et al. The effect of inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on soybean yield and mineral phosphorus utilization in subtropical-tropical soils. *Plant Soil*, Dordrecht, v.95, n.2, p.245-253, 1986.

Received on February 06, 2002.

Accepted on August 12, 2002.