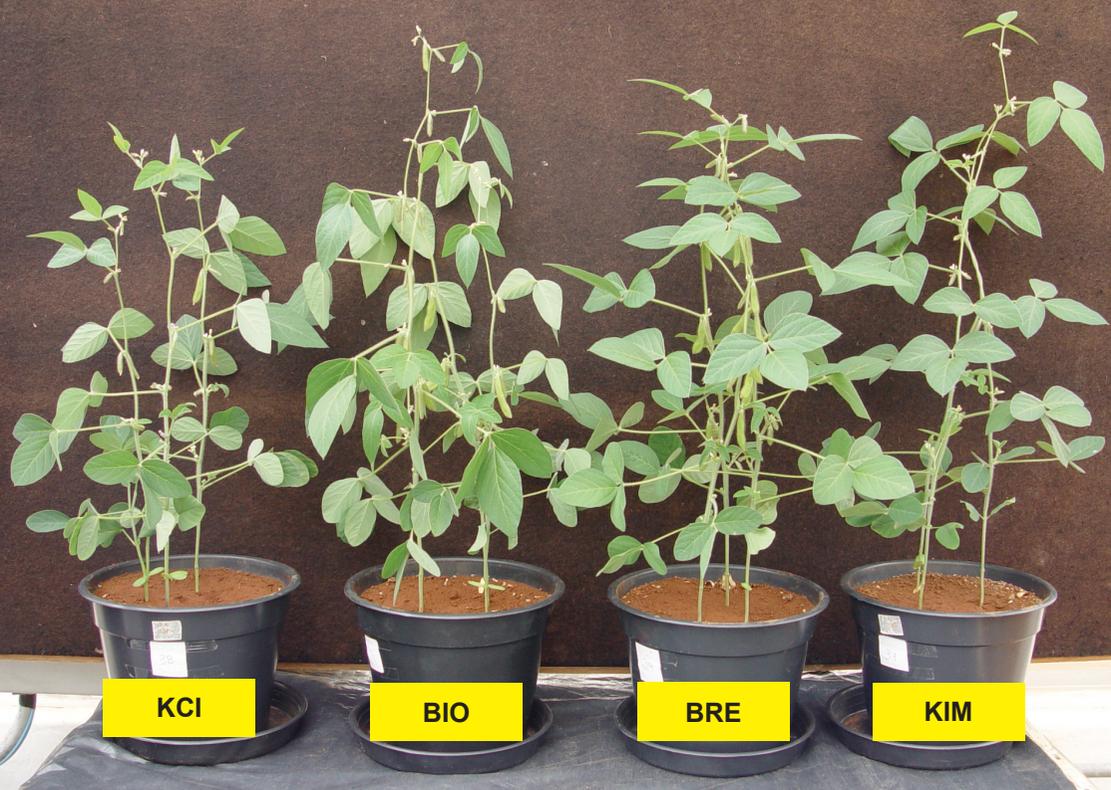


Disponibilização de K de Rochas Silicáticas para Plantas de Soja Inoculadas com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA)

com FMAs



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 303

Disponibilização de K de Rochas Silicáticas para Plantas de Soja Inoculadas com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA)

*Leide Rovênia Miranda de Andrade
Alessandra S. Gelape Faleiro
Denise A. S. Sobrinho
Mônica Teixeira do Nascimento
Alexandre L. de Souza*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Claudio Takao Karia*

Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*

Secretária: *Maria Edilva Nogueira*

Colaborador: *Valter Lopes*

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Equipe de revisão: *Francisca Eljani do Nascimento*

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Normalização bibliográfica: *Marilaine Schaun Pelufé*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Impressão e acabamento: *Alexandre Moreira Veloso*

Divino Batista de Souza

1ª edição

1ª impressão (2011): tiragem 100 exemplares

Edição online (2011)

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados**

D612 Disponibilização de K de rochas silicáticas para plantas de soja inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) / Leide Rovênia Miranda de Andrade... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2011.

21 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X ; 303).

1. Fungo. 2. Micorriza. 3. Rizosfera. 4. Soja. I. Andrade, Leide Rovênia Miranda de. II. Série.

633.34 - CDD-21

© Embrapa 2011

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Introdução	7
Material e Métodos.....	8
Aplicação dos tratamentos	9
Delineamento experimental e análise estatística	11
Resultados e Discussão.....	11
Conclusões.....	19
Agradecimentos	20
Referências	20

Disponibilização de K de Rochas Silicáticas para Plantas de Soja Inoculadas com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA)

Leide Rovenia Miranda de Andrade¹; Alessandra S. Gelape Faleiro²; Denise A. S. Sobrinho²; Mônica Teixeira do Nascimento²; Alexandre L. de Souza²

Resumo

Fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) aumentam o volume de solo explorado pelas raízes, com conseqüente aumento na absorção de nutrientes pelas plantas, podendo acelerar o intemperismo de minerais na rizosfera. O objetivo deste trabalho foi avaliar a ação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) na disponibilização de K de rochas silicáticas para plantas de soja. Foram adicionadas aos solos 5 t/ha de rochas. A eficiência na disponibilização de K dos materiais (IEF) foi comparada ao tratamento controle (Solo), que recebeu somente adubação básica. Independente da rocha, as plantas micorrizadas tiveram aumento significativo de peso de matéria seca total (MS), do sistema radicular, das relações microbiológicas e da acumulação de K (K_{Acu}) e outros nutrientes na MS. Com relação ao K_{Acu}, as rochas foram menos eficientes que o KCl como fonte de K, mas não houve diferença entre os tratamentos quanto à MS e ao K₊ residual no solo. Os IEFs indicaram a seguinte ordem de solubilidade: KCl > BRE > KIM > BIO. O efeito benéfico da micorriza na absorção de nutrientes tanto na forma solúvel quanto na de rocha deverá ser considerado ao definir manejo de áreas agrícolas com o objetivo de aumentar a disponibilidade de K de fontes de solubilidade lenta.

Termos para indexação: atividade microbiológica; fontes de solubilidade lenta; índice de eficiência de fontes de nutrientes; rizosfera.

¹ Engenheira Agrônoma, Ph.D., pesquisadora da Embrapa Cerrados, leide@cpac.embrapa.br

² Bolsistas DTI/ITI - CNPq

Availability of K of Rocks Silicate Soybean Plant Inoculated with Mycorrhizal Fungi (AMF)

Abstract

Arbuscular mycorrhiza fungi (AMF's) are known to increase the volume of soil explored by roots and these can accelerate the intemperism of minerals at the rhizosphere. This work had the aim to evaluate the effects of potassium bearing rocks brecha alcalina (BRE), kimberlito (KIM), biotita xisto (BIO), and the soluble K source KCl and the inoculation of AMF's on growth of soybean seedlings. The amount of rocks applied to soils was equivalent to 5 t/ha. The efficiency of K availability (EI) from the materials was compared with a control treatment (Solo), which received only a basic fertilization. Independent of the source of K, the inoculation of plants with AMF's increased the plant total dry matter weight (DM), the root system, the microbiological relations and the K (KAcu) and nutrients absorbed by plants. The comparison among materials, done in the AMF's treatments, indicated significant effects of the rocks on the KAcu, but not for DM and K + remaining in soil. Regarding to KAcu, the K rocks were less efficient than KCl in providing K to plants. The EIs indicated the following order of solubility: KCl > BRE > KIM > BIO. This work showed the potential of AMF's on increasing the availability of K from non-exchangeable forms present in rocks. This information is important to define the management of agricultural areas with the objective to increasing the availability of K from slow release sources.

Index terms: efficiency indices of solubility; microbiological activities; rhizosphere; slow release fertilizer.

Introdução

Atividades biológicas relacionadas às raízes das plantas e microrganismos influenciam fortemente as propriedades químicas e físicas do solo, principalmente aquelas na rizosfera. Nesse aspecto, a ação da biota do solo é fundamental porque induzem a dissolução de minerais primários aplicados ao solo como fonte de nutrientes para as plantas.

Aumentos na concentração de ácidos orgânicos e inorgânicos, excretados por raízes e hifas de fungos, podem reduzir o pH do solo e causar a solubilização direta dos minerais. Os microrganismos também absorvem nutrientes da solução do solo, o que causa uma zona de depleção iônica e acelera os processos de reações de intemperismo pelos efeitos de ação de massa (BARKER et al., 1997; JONGMANS et al., 1997; HARLEY; GILKES, 2000).

Fungos micorrízicos ectomicorrízicos ou endomicorrízicos são conhecidos por aumentar o volume de solo explorado pelas raízes, com consequente aumento na absorção e a translocação de nutrientes, como fósforo (P), nitrogênio (N), zinco (Zn), cobre (Cu) e enxofre (S). Esses nutrientes são absorvidos em zonas cujas concentrações na solução do solo são muito baixas, podendo assim acelerar o intemperismo de minerais na rizosfera. As hifas desses fungos, além de aumentarem a área de absorção de nutrientes pelas plantas, também são capazes de penetrar em pequenos microsítios onde as raízes não alcançam (FINLAY, 2004).

Jongmans et al. (1997) relatam uma numerosa rede de esporos tubulares formadas por ácidos orgânicos exudados por fungos em minerais intemperizáveis sob muitas florestas de coníferas europeias. Segundo os autores, as hifas de micorrizas simbióticas translocam minerais dissolvidos dos microporos isolados diretamente para suas plantas hospedeiras, sobrepondo a competição pela absorção de nutrientes por outros organismos. Os pesquisadores afirmam ainda que os microporos foram formados por fungos micorrízicos ou saprófitos, que exudam ácidos orgânicos das pontas de suas hifas. Tais ácidos

aumentariam o intemperismo mineral pela formação de complexos com alumínio. Sob condições controladas, Alves et al. (2010) observaram que a inoculação de plantas de eucalipto com fungos ectomicorrízicos aumentou a absorção de K da rocha brecha alcalina. Sugere-se, com esses resultados, que o potencial para dissolução de rochas silicáticas moídas pode ser acelerado pela remoção de nutrientes e a adição de ácidos por fungos, entre eles os micorrízicos (GADD, 2007; YUAN et al., 2004). Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a ação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) na disponibilização de K de rochas silicáticas para plantas de soja.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido sob condições controladas, utilizando-se um Latossolo Vermelho-Argiloso (LE), coletado na camada de 0 cm a 20 cm, em campo experimental da Embrapa Cerrados. O solo foi passado em peneira de malha 2 mm, homogeneizado e então retirada amostra para caracterização física e química, de acordo com metodologias descritas por Embrapa (1999) (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas e físicas de um solo típico de Cerrado (n = 3).

Solo	Arg. M.O.		pH _{H2O}	H+Al	Al	Ca+Mg	K*	P*	*Cu	*Fe	*Mn	*Zn
	g kg ⁻¹											
LE	600	2,51	5,0	10,7	1,05	0,32	0,064	0,89	0,66	88,3	4,76	4,36

*Extrator Mehlich⁻¹

As unidades experimentais constaram de vasos plásticos com capacidade para 3 L, contendo 2,74 kg de solo seco, esterelizado por meio de autoclavagem. Cerca de 30 dias antes da semeadura, foi aplicada uma mistura de carbonatos de cálcio e de magnésio (3:1), p.a, em cada unidade, na quantidade necessária para elevar a saturação por bases do solo a 50%. Os vasos foram umedecidos até 80% da

capacidade de campo (c.c.) com água destilada. Quinze dias antes do plantio, os demais nutrientes essenciais, exceto N, foram adicionados, na forma solúvel, nas quantidades: 50 mg de P (H_3PO_4); 0,50 mg B (H_3BO_3); 2,0 mg Cu ($CuSO_4$); 3,0 mg Mn ($MnSO_4$); 0,25 mg Mo (Na_2MoO_4); 4 mg Zn ($ZnSO_4$); 20 mg S (sulfatos), por kg de solo. Os tratamentos foram aplicados sete dias antes do plantio. No plantio, as sementes de soja (5 sementes por vaso) foram inoculadas com uma mistura das estirpes de bactérias do gênero *Bradyrhizobium* CPAC7 e CPAC15, seguindo as recomendações de Vargas e Hungria (1997).

Foram utilizadas amostras das rochas brecha alcalina (BRE), kimberlito – ultrabásica alcalina (KIM) e biotita xisto (BIO), na fração natural, moída de forma que o tamanho médio das partículas fosse menor que 0,300 mm, o que corresponde à granulometria de comercialização de calcários. A composição química das rochas, com os teores totais dos nutrientes para as plantas, está descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Composição litogeoquímica de rochas utilizadas como fonte de K para as plantas.

Rochas	K ₂ O	P ₂ O ₅	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	Cu	Zn
	%						ppm	
Biotita (BIO)	4,25	0,06	6,33	14,92	9,88	1,23	20	416
Brecha (BRE)	2,73	0,83	12,64	6,19	11,74	1,25	75	151
Kimberlito (KIM)	3,44	0,69	12,49	18,92	11,77	1,74	84	124

Determinações em ICP/AES (IG/UnB).

Fonte: Instituto de Geociências / UnB.

Aplicação dos tratamentos

O esquema dos tratamentos aplicados está descrito na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de K aplicada e inoculação por fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) nos tratamentos.

Fontes de K	FMAs	Teor de K g kg ⁻¹	K adicionado	
			Rocha ⁽¹⁾	KCl
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Tratamentos de referência ⁽²⁾ :				
A) Solo	Sem	(0,025) ⁽³⁾	-	-
B) KCl	Sem	-	-	137
	Com	-	-	137

Rochas				
BIO	Sem	35,30	242	-
	Com	35,30	242	-
BRE	Sem	17,76	122	-
	Com	17,76	122	-
KIM	Sem	28,55	196	-
	Com	28,55	196	-

⁽¹⁾ As rochas foram adicionadas ao solo na quantidade equivalente a 5 t/ha (6,85 g/vaso), sete dias antes do plantio; ⁽²⁾Solo = sem adição de qualquer fonte de K; ⁽³⁾(25,0 mg K /kg solo) = quantidade de K originalmente no solo, na forma trocável com solução Acetato de amônio. Todos os tratamentos receberam a adubação básica descrita anteriormente.

Na preparação das doses de aplicação das rochas, não foi considerado o teor de K de cada material, mas a quantidade máxima de 5 t ha⁻¹ para distribuição e incorporação ao solo, o que correspondeu a 6,85 g rocha por vaso. Um tratamento controle (Solo) recebeu somente a adubação básica. Em outro tratamento (KCl), foi aplicado K na forma de KCl, na dose de 50 mg K kg⁻¹ solo, e os demais nutrientes. Essa dose, que corresponde a 120 kg K₂O ha⁻¹, foi selecionada por ser realística para solos com baixa disponibilidade deste nutriente.

Em metade dos tratamentos que receberam as rochas e KCl, foi realizada a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (com FMAs), com uma mistura das espécies *Glomus etunicatum* + *Entrophospora colombiana*. Como fonte de inóculo, foram utilizados 20 g/vaso de um substrato com esporos e raízes colonizados pelos fungos, de maneira a fornecer 100 esporos por planta. Os demais tratamentos (sem FMAs) receberam inóculo filtrado, sem a presença de esporos de FMAs, para que restituísse os demais microrganismos do

solo. O inóculo de FMAs foi produzido no Laboratório de Micorrizas da Embrapa Cerrados, tendo sido adicionado ao solo nos vasos, logo abaixo da semente.

O controle de umidade dos vasos foi mantido a 80% da c.c., com água destilada, através de pesagens regulares. Após o desbaste, foram mantidas três plantas por vaso. No início do período de formação de vagens, aproximadamente aos 55 dias após a semeadura, efetuou-se o corte da parte aérea. O material colhido foi seco em estufa a 70 °C e, após a determinação da matéria seca, foram analisados os teores de macro (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn) contidos no tecido vegetal.

Após o corte das plantas, o solo foi misturado cuidadosamente e uma amostra foi retirada para análise química de macro e micronutrientes, acidez titulável, Al trocável e pH em água. As raízes foram separadas em peneiras, lavadas e mantidas em câmara fria (4 °C), para posterior avaliação da taxa de colonização radicular pelos FMAs, número e peso de nódulos da bactéria rizóbio. Os parâmetros radiculares como comprimento, diâmetro médio e volume de raízes foram medidos pelo software Delta-T Scan™, através de análise de imagens digitais obtidas com um scanner de mesa. Após o registro das imagens, as raízes foram pesadas e colocadas em estufa para a determinação de matéria seca e teor de nutrientes acumulados.

Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento utilizado foi o completamente casualizado, com nove tratamentos e três repetições. As médias de cada tratamento foram comparadas com um tratamento de referência (Solo) e a significância avaliada pelo teste de Dunnett ($\alpha = 0,05$). Nas análises, foi utilizado o pacote estatístico SAS v. 6.1.

Resultados e Discussão

O efeito dos tratamentos aplicados no crescimento das plantas são mostrados na Figura 1.

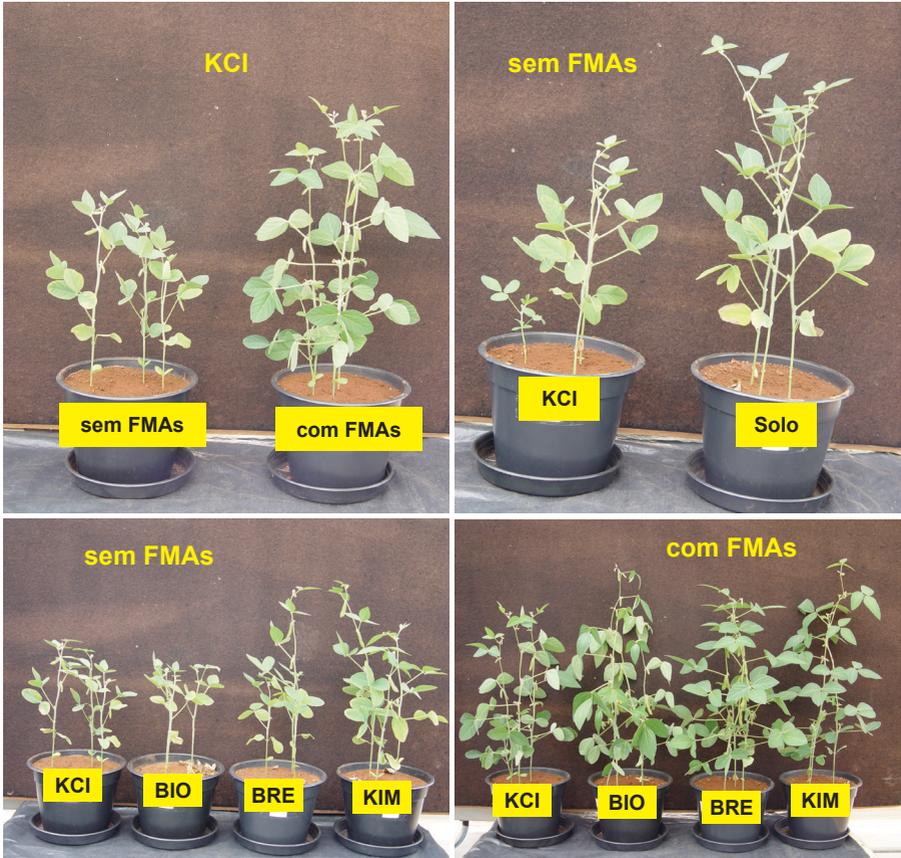


Figura 1. Efeitos da aplicação das rochas potássicas biotita xisto (BIO), brecha piroclástica (BRE) e kimberlito – ultramáfica alcalina (KIM) e da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) no crescimento de plantas de soja.

Sem a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), não houve diferenças significativas entre as rochas ou a fonte solúvel KCl e o tratamento de referência (Solo) para o índice de área foliar total (IAF), produção de matéria seca (MS) e teores de K nos tecidos de parte aérea (Tabela 4). Já na presença de FMAs, todas as fontes de K promoveram incrementos significativos no IAF e na MS em relação ao tratamento controle (Solo). Entretanto, os teores de K foram superiores ao do tratamento controle apenas com a aplicação do KCl.

Tabela 4. Efeito da aplicação de rochas potássicas e da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) no índice de área foliar (IAF), na produção de matéria seca (MS) e no teor de K nos tecidos de parte aérea de plantas de soja (n = 3).

Fontes de K	FMAs	I.A.F. mm ²	MS g vaso ⁻¹	Teor de K g kg ⁻¹
Solo	Sem	413,4	2,90	12,17
KCl	Sem	350,3	2,70	9,41
BIO	Sem	294,1	2,55	8,28
BRE	Sem	334,9	2,36	8,15
KIM	Sem	436,8	3,33	8,43
KCl	Com	864,1 *	6,83 *	20,61 *
BIO	Com	1.018,0 *	4,49 *	13,26
BRE	Com	1.070,4 *	8,39 *	11,85
KIM	Com	840,7 *	6,18 *	16,37
Média		624,7	4,86	12,06
C.V. (%)		20,9	9,5	15,4

* Comparação significativa de todos os tratamentos com o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($\alpha < 0,05$).

Além do K, os teores de Ca, Mg, P e S nos tecidos das plantas foram superiores ao das plantas cultivadas no tratamento de referência somente quando essas foram inoculadas com FMAs (Tabela 5). Neste tratamento, as plantas produziram 2,2 vezes mais matéria seca de parte aérea e acumularam, em média, 4,7 vezes mais K; 3,4 vezes mais Ca; 11,4 vezes mais Mg; e 3,1 vezes mais S.

Tabela 5. Efeitos da aplicação de rochas potássicas e da inoculação de raízes com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) nos teores de nutrientes na parte aérea de soja (n = 3).

Fontes de K	FMAs	K	Ca	Mg	P	S
		mg/vaso				
SOLO	Sem	34,72	29,51	7,56	2,32	4,28
KCl	Sem	25,82	15,74	2,51	2,62	4,92
BIO	Sem	21,80	19,00	2,43	1,96	3,98
BRE	Sem	19,58	19,20	3,66	1,70	3,85
KIM	Sem	28,50	26,44	3,76	2,73	5,04
KCl	Com	140,77 *	49,71	28,92 *	14,24 *	13,09 *
BIO	Com	109,90 *	79,84 *	41,11 *	15,38 *	13,91 *
BRE	Com	97,34 *	77,13 *	30,48 *	15,18 *	13,54 *
KIM	Com	100,81 *	59,14 *	34,08 *	13,11 *	13,14 *
Média		64,36	41,75	17,17	7,69	8,42
CV (%)		13,2	22,2	38,5	16,0	12,7

*Comparação significativa de cada tratamento com tratamento controle pelo teste de Dunnett ($\alpha < 0,05$).

Nos tratamentos com inoculação de FMAs, a taxa de colonização micorrízica variou de 26% a 40% (Tabela 6). Sem a inoculação não houve colonização das raízes em todos os tratamentos. A não colonização das raízes nesses tratamentos reflete o efeito da esterilização do solo, antes da instalação do experimento. De forma semelhante ao ocorrido com os parâmetros de parte aérea, na ausência de inoculação com FMAs também não houve efeitos significativos da aplicação das rochas potássicas nos atributos radiculares (matéria seca, comprimento e volume de raízes), no número e no peso de nódulos das plantas. Entretanto, quando foram inoculadas com os fungos, somente com a aplicação da rocha biotita esses mesmos parâmetros foram significativamente superiores aos do tratamento Solo. O comprimento de raiz, com a rocha brecha, e o peso de nódulos, com KCl, também foram influenciados significativamente com a inoculação das plantas com FMAs. O diâmetro médio de raízes (D) não sofreu influência dos tratamentos aplicados ($P > 0,05$).

Tabela 6. Efeitos da aplicação de rochas potássicas e da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) nos parâmetros de desenvolvimento de sistema radicular e na taxa de colonização micorrízica (COL), no número (NNOD) e peso de nódulos (PNOD) de rizóbio em raízes de plantas de soja (n = 3).

Fontes de K	FMAs	MS raízes gl/vaso	Atributos radiculares			Parâmetros microbiológicos		
			L ⁽¹⁾	D ⁽²⁾	V ⁽³⁾	COL	NNOD	PNOD
			m	mm	ml/ml	%	nº./vaso	mg/vaso
Solo	Sem	0,63	38,4	0,52	0,0032	0,0	11	4,3
KCl	Sem	0,40	40,4	0,59	0,0025	0,0	12	1,3
BIO	Sem	0,39	29,7	0,61	0,0031	0,0	15	3,3
BRE	Sem	0,41	28,7	0,61	0,0031	0,0	9	1,7
KIM	Sem	0,50	40,4	0,59	0,0037	0,0	21	5,0
KCl	Com	0,85	67,6 *	0,50	0,0043	41,3 *	30	56,0
BIO	Com	0,96 *	71,0 *	0,51	0,0066 *	34,7 *	49 *	120,3 *
BRE	Com	0,83	60,8	0,51	0,0048	25,7 *	33	97,4 *
KIM	Com	0,77	55,3	0,54	0,0049	28,7 *	16	36,8
Média		0,64	46,4	0,55	0,0040	14,5	21,7	36,3
CV (%)		17,5	25,0	9,3	24,9	25,5	47,1	90,1

⁽¹⁾L = comprimento total de raízes; ⁽²⁾D = diâmetro médio de raízes; ⁽³⁾V = volume de raízes.

* Comparação significativa de todos os tratamentos com o tratamento controle pelo teste de Dunnett ($\hat{\alpha} < 0,05$).

As mudanças ocorridas em algumas propriedades químicas do solo ao final do experimento, em função dos tratamentos aplicados, estão representadas na Tabela 7. No início do experimento, o K trocável do solo extraído com acetato de amônio indicou 25 mg K kg⁻¹ solo. A despeito da baixa disponibilidade desse nutriente, as raízes das plantas criaram condições de liberação de K, o que resultou em 34,72 mg de K acumulados na matéria seca. Esse resultado sugere a absorção de K de formas inicialmente não-trocáveis, uma vez que a quantidade de K trocável permaneceu relativamente invariável (24,6 mg K kg⁻¹ solo) ao final do ensaio.

Tabela 7. Efeitos da aplicação de rochas potássicas e da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) nos teores de alguns elementos extraídos do solo após o cultivo de plantas de soja (n = 3).

Fontes de K	FMAs	pH _{H₂O}	KAce	Δ KAce ⁽¹⁾	Ca	Mg	P
			cmoc _c dm ⁻³	dm ⁻³	cmoc _c dm ⁻³	cmoc _c dm ⁻³	mg dm ⁻³
Solo	Sem	5,9	0,063	-	1,51	0,417	1,21
KCl	Sem	5,8	0,160 *	0,097	1,49	0,483 *	1,79
BIO	Sem	5,9	0,083	0,020	1,52	0,590 *	1,95
BRE	Sem	5,9	0,097	0,034	1,55	0,497 *	2,27
KIM	Sem	6,1	0,083	0,020	1,52	0,657 *	2,97 *
KCl	Com	6,1	0,093	0,030	1,42	0,420	1,36
BIO	Com	6,1	0,049	- 0,014	1,50	0,553 *	1,21
BRE	Com	6,1	0,043	- 0,020	1,45	0,497 *	2,22
KIM	Com	6,2*	0,093	0,030	1,52	0,507 *	2,71 *
Média		6,0	0,085		1,50	0,530	1,97
CV (%)		1,7	28,1		4,3	5,0	24,6

Unidade experimental = 3 plantas/vaso; KAce = K⁺ extraído com acetato de amônio.t

⁽¹⁾ΔKAce = (KSOLO - Kfontes).

*Comparação significativa de todos os tratamentos com o tratamento controle pelo teste de Dunnett (p < 0,05).

Nos demais tratamentos, o K trocável foi superior somente à referência na presença da fonte solúvel KCl, sem a inoculação com FMAs. Nesse caso, todo o K aplicado foi solubilizado, com 25,4 mg de K sendo recuperado na matéria seca das plantas (Tabela 5), resultando em aumento de 0,097 cmoc K dm⁻³ no solo (103,7 mg de K por vaso). Apesar das diferenças não significativas, com a aplicação das rochas houve acréscimos, que variaram de 32% a 54%, de K trocável no solo em relação ao tratamento sem aplicação de K. Grande parte desse K liberado das fontes não foi absorvido em razão do baixo crescimento das plantas na ausência da inoculação com FMAs. Em contrapartida, a retirada de K do solo pelas raízes micorrizadas, no caso da rocha brecha e biotita, foi superior ao solubilizado dessas fontes (ΔK negativo), indicando que parte do K acumulado na matéria seca originou-se da reserva do solo.

Os resultados acima comprovaram que, independente da fonte de K utilizada, ocorrem efeitos estimuladores da inoculação com FMAs no desenvolvimento das plantas, na absorção de nutrientes e na produção de nódulos de rizóbio nas raízes. Rahman e Parsons (1997) também observaram efeitos positivos da dupla inoculação do fungo endomicorrízico *Glomus mosseae* e da bactéria *Azorhizobium caulinodans* na infecção micorrízica das raízes, no crescimento inicial e na absorção de N e P por plantas de *Sesbania rostrata* cultivadas com rocha fosfática, de solubilidade lenta.

A comparação entre as fontes em relação à capacidade de liberar K para as plantas, realizada somente entre os tratamentos com FMAS, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Efeitos de rochas potássicas na produção de matéria seca total e no K acumulado nos tecidos (K-ac) de plantas de soja inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), no K residual do solo e no Índice de Eficiência da fonte (Ef-fonte) (FMAs) (n = 3).

Fontes de K	K adicionado	MS total	K-ac	Ef-fonte ⁽¹⁾	K ⁺ residual no solo
	mg vaso ⁻¹ mg vaso ⁻¹		%	mg vaso
KCl	137	7,68	142,3 a	103,6	99,5
BIO	242	9,45	111,4 b	43,8	52,1
BRE	122	9,21	98,7 b	76,6	45,7
KIM	196	6,96	102,3 b	49,5	99,5
Média		8,32	113,7		74,2
CV (%)		16,1	7,8		45,0

⁽¹⁾Ef-fonte = (K-fonte - 5,3 mg K/vaso) * 100/ K aplicado; médias seguidas de letras iguais, em uma mesma coluna, não são diferentes pelo teste F (p > 0,05).

Em relação às quantidades de K total aplicadas, os tratamentos seguiram à seguinte ordem de eficiência: biotita (88 mg K kg⁻¹ solo) > kimberlito (71 mg K kg⁻¹ solo) > KCl (50 mg K kg⁻¹ solo) > brecha (45 mg K kg⁻¹ solo). Apesar de diferenças de aproximadamente 50% de K entre as quantidades aplicadas, não houve efeito das fontes na produção de matéria seca total das plantas e no K residual no solo (P > 0,05), indicando que, nessas doses, as rochas foram tão eficientes

quanto o KCl como fonte de potássio. No entanto, o teor de K nos tecidos das plantas diferiu significativamente entre as fontes ($P < 0,05$). Quando fornecido na forma solúvel, as plantas absorveram em média 27% a mais de K do que as aquelas cultivadas em presença das rochas, que, por sua vez, não diferiram entre si. Na presença da fonte solúvel, as plantas acumularam o equivalente a 100% do aplicado ($137,0 \text{ mg de K vaso}^{-1}$) e mais $5,3 \text{ mg de K}$, que foram absorvidos do solo. Considerando no seu cálculo a contribuição do solo no K acumulado nos tecidos, o Índice de Eficiência da Fonte (Ef-fonte) (Tabela 8) indicou que o K 'disponibilizado' por cada fonte foi da ordem de 438, 766 e 495 mg de K por cada 1 grama de K aplicados como biotita, brecha e kimberlito, respectivamente.

Em termos de produção de matéria seca, as rochas foram tão eficientes quanto o KCl como fonte de potássio para soja. Porém o tratamento com KCl aumentou significativamente a concentração de K nos tecidos em relação às rochas.

O K do solo está localizado principalmente dentro de minerais como micas, feldspatos e seus produtos de intemperismo. O K trocável, aqui definido como K extraído com acetato de amônio 1 M, representa uma pequena fração do K total. Porém, em algumas situações, o K residual não trocável na rizosfera serve como uma importante fonte de K para as plantas (MORITSUKA et al., 2004; PARIS et al., 1995). Neste trabalho, foi utilizado um solo típico de Cerrado, constituído predominantemente de argila não expansiva do tipo 1:1, que forneceu cerca de 13 mg K kg^{-1} de formas não trocáveis para as plantas. Os teores de K acumulado nos tecidos, de maneira geral, excederam o valor de variação de K no solo (ΔK), o que sugere que pelo menos parte do K necessário ao desenvolvimento das plantas foi absorvido de formas não trocáveis originalmente das rochas e/ou do solo.

Segundo Moritsuka et al. (2004), para minerais, os processos de liberação de K não trocável induzidos pelas raízes podem ser explicados pelos processos de reações de troca, dissolução mineral ou ambos. Nos estudos de Hinsinger e Jaillard (1993), a liberação de K das

entrecamadas na flogopita, que ocorreu na rizosfera de azevém, envolveu troca de K da entrecamada por cátion de alta energia de hidratação e a consequente expansão do espaço na entrecamada. No trabalho de Hissinger et al. (1992), a liberação do K da estrutura da flogopita na rizosfera de colza foi sugerida como resultado de dissolução por ácido do mineral devido a excreção de prótons pelas raízes. Aqui, a maior proliferação de raízes nos tratamentos com FMAs certamente contribuiu para a ocorrência dos processos de depleção de K trocável da solução do solo, levando ao desequilíbrio das formas trocáveis e não trocáveis. A extração direta, pelas raízes das plantas e pelas hifas dos fungos, do K das entrecamadas dos minerais de mica e flogopita existente nestas rochas também pode ter ocorrido, conforme sugerido por Jongmans et al. (1997).

Neste estudo ficaram comprovados os efeitos benéficos da micorriza na absorção do K, tanto na forma solúvel quanto na forma de rocha, além dos demais nutrientes. Essa informação é importante para definir manejo de áreas agrícolas com maior possibilidade utilização de K de fontes de solubilidade lenta. Sistemas agrícolas com cultivo de adubos verdes ou espécies dependentes de micorriza e potencial para a multiplicação de fungos micorrízicos na área devem provavelmente contribuir para o maior aproveitamento dos nutrientes contidos nas rochas. Ademais, as rochas aplicadas como fonte de K em áreas com baixo potencial de inóculo desses fungos podem não ter a eficiência esperada.

Conclusões

Os resultados deste trabalho comprovam o efeito benéfico da presença de micorriza na absorção de nutrientes tanto na forma solúvel quanto na forma de rocha. Essa informação é importante para definir manejo de áreas agrícolas com maior possibilidade de efeitos positivos na disponibilização de K de fontes de solubilidade lenta.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Dra. Jeanne Claessen, pela colaboração técnica neste trabalho; ao técnico de laboratório Valter Lopes pela orientação na montagem do experimento e na coleta de dados sobre micorriza; ao engenheiro agrônomo Helon Chalub Silva, bolsista da Embrapa Cerrados, e ao técnico agrícola Emerson Alves dos Santos, pelas análises de raízes; ao professor José Carlos Gaspar, da Universidade de Brasília (IG/UnB), coordenador do Projeto Institucional CNPq/UnB/Embrapa: 01.2002.355.03: *Pó de rocha: uma alternativa à importação de K para uso na agricultura brasileira*, fonte dos recursos financeiros deste trabalho; aos doutores Éder de Souza Martins e Cynthia Torres Toledo Machado, da Embrapa Cerrados; Álvaro Vilela de Resende, da Embrapa Milho e Sorgo; Edermar J. Corazza, da Embrapa Informação Tecnológica; e ao professor Claudinei Gouveia de Oliveira, da Universidade de Brasília (IG/UnB), pela colaboração técnica no referido projeto.

Referências

- ALVES, L.; OLIVEIRA, V. L.; SILVA FILHO, G. N. Utilization of rocks and ectomycorrhizal fungi to promote growth of eucalypt. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 41, p. 676-684, 2010.
- BARKER, W. W.; WELCH, S. A.; BANFIELD, J. F. Biogeochemical weathering of silicate minerals. In: BANFIELD, J. F.; NEALSON, K. H. (Ed.). **Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals**, v. 35, p. 391-421, 1997. Mineralogical society of America, Washington.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.
- FINLAY, R. D. Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles. **Mycologist**, v. 18, p. 91, 2004.
- GADD, G. M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, biowethering and bioremediation. **Mycological Research**, v. 111, p. 3-49, 2007.
- HARLEY, A. D.; GILKES, R. J. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. **Nutrient Cycling Agroecosystem**, v. 56, p. 11-36, 2000.

HINSINGER, P.; JAILLARD, B. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **Journal of Soil Science**, v. 44, p. 525-534, 1993.

HINSINGER, P.; JAILLARD, B.; DUFEY, J. E. Rapid weathering of a trioctahedral mica by roots of ryegrass. **Soil Science Society of American Journal**, v. 56, p. 977-982, 1992.

JONGMANS, A. G.; VAN BREEMEN, N.; LUNDSTRÖM, U.; VANS HEES, P. A. W.; FINLAY, R. D.; SRINIVASAN, M.; UNESTAM, T.; GIESLER, R.; MELDERUD, P. A.; OLSSON, M. Rock-eating fungi. **Nature**, v. 389, p. 682-683, 1997.

LEYVAL, C.; BERTHELIN, J. Interactions between *Laccaria laccata*, *Agrobacterium radiobacter* and beech roots: influence on P, K, Mg, and Fe mobilization from minerals and plant growth. **Plant Soil**, v. 117, p. 103-110, 1989.

MORITSUKA, N.; YANAI, J.; KASAKI, I. Possible processes releasing nonexchangeable potassium from the rhizosphere of maize. **Plant Soil**, p. 261-268, 2004.

PARIS, F.; BONNAUD, P.; RANGER, J.; LAPEYRIE, F. In vitro weathering of phosphorus of phlogopite by ectomycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 177, p. 191 – 201, 1995.

PARIS, F.; BOTTON, B.; LAPEYRIE, F. In vitro weathering of phlogopite by ectomycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 179, p. 141–150, 1996.

RAHMAN, M. K.; PARSONS, J. W. Effects of inoculation with *Glomus mosseae*, *Azorhizobium caulinodans* and rock phosphate on the growth of and nitrogen and phosphorus accumulation in *Sesbania rostrata*. **Biology Fertility of Soils**, v. 25, p. 45-52, 1997.

VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. Fixação biológica de N₂ na cultura da soja. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos Solos de Cerrados**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1997. p. 297-360.

YUAN, L.; HUANG, J.; LI, X.; CHRISTIE, P. Biological mobilization of potassium from clay minerals by ectomycorrhizal fungi and eucalypt seedling roots. **Plant and Soil**, v. 262, p. 351-361, 2004.

Embrapa

Cerrados

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento



CGPE 9910