

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SOLO E RENDIMENTO DE MASSA SECA DE MILHO EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO DE FOSFATOS, EM DOIS NÍVEIS DE ACIDEZ⁽¹⁾

P. R. ERNANI⁽²⁾, C. STECKLING⁽³⁾ & C. BAYER⁽²⁾

RESUMO

Apesar da baixa mobilidade do P no solo, os fertilizantes fosfatados estão sendo aplicados sobre a superfície, em alguns sistemas de cultivo. Pouco se conhece sobre a eficiência dessa forma de aplicação, a qual pode ser influenciada pela característica dos fosfatos e pelo pH do solo. Este trabalho objetivou avaliar o efeito do método de aplicação (superficial ou incorporado) de alguns fertilizantes fosfatados (diamônio fosfato - DAP, superfosfato triplo e fosfato natural ARAD), em dois valores de pH (com e sem calcário), em algumas características químicas do solo e no rendimento de massa seca de milho. Cultivou-se milho durante 21 dias, em câmara de crescimento, em unidades experimentais com 3,0 kg de solo (base seca). Na ausência de calcário (pH 4,7), a aplicação dos fosfatos na superfície do solo proporcionou maiores rendimentos de massa seca e maior absorção de P pelo milho do que a incorporação dos fosfatos, sendo o DAP o fertilizante mais eficiente. Na presença de calcário (pH 5,7), não houve diferença entre os métodos de aplicação, e os maiores rendimentos foram obtidos com as fontes solúveis. A aplicação dos fosfatos na superfície do solo aumentou a concentração de P até 3 cm de profundidade. Na ausência de déficit hídrico, o milho foi eficiente em absorver o P aplicado sobre a superfície do solo a partir de fontes solúveis em água, mesmo tendo havido baixa mobilidade vertical do nutriente.

Termos de indexação: diamônio fosfato, superfosfato triplo, fosfato natural ARAD, acidez do solo.

⁽¹⁾ Realizado com recursos do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Recebido para publicação em agosto de 2000 e aprovado em março de 2001.

⁽²⁾ Professor do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Bolsista do CNPq. E-mail: prennani@cav.udesc.br

⁽³⁾ Mestrando em Ciência do Solo, UDESC.

SUMMARY: *SOIL CHEMICAL CHARACTERISTICS AND CORN DRY MASS YIELD AS AFFECTED BY APPLICATION METHODS OF PHOSPHATE FERTILIZERS, AT TWO SOIL pH LEVELS*

Phosphorus has very low mobility into the soil, but in spite of this, it has been applied on the soil surface on some soil tillage systems. The efficiency of this form of application is not well known yet but can be affected by the soil pH and type of phosphate applied. This study aimed to assess the effect of the application method (mixed into the soil or on the surface, without incorporation) of phosphate fertilizers (diammonium phosphate, triple superphosphate, and ARAD rock phosphate), at two pH values (with and without lime), on some soil chemical characteristics and on corn dry matter yield. Corn plants were grown during 21 days after seed emergence in a growth chamber, in experimental units of 3.0 kg of soil (dry basis). In absence of liming (pH-H₂O 4.7), addition of phosphates on the soil surface gave better yield and higher P uptake than their incorporation into the soil, and diammonium phosphate was the most efficient source. On limed soil (pH-H₂O 5.7), there was no difference between the application methods, and the best yields were obtained with the soluble phosphate sources. Addition of phosphate fertilizers on the soil surface increased P in the soil up to 3 cm depth. In absence of water deficit, corn plants could obtain enough P from soluble phosphates added to the soil surface, despite their low mobility.

Index terms: diammonium phosphate, triple superphosphate, ARAD rock phosphate, soil acidity, application methods.

INTRODUÇÃO

Nos solos do sul do Brasil, com acidez elevada e baixa disponibilidade de fósforo, a aplicação de calcário e de fertilizantes fosfatados é fundamental para a obtenção de altos rendimentos vegetais. A eficiência do P aplicado ao solo varia de acordo com o tipo de fertilizante fosfatado (Ernani & Barber, 1990; 1991), com o método de aplicação (Muzilli, 1983; Anghinoni, 1992), e com a quantidade aplicada (Anghinoni, 1992; Ernani et al., 2000), além de características de solo, como pH (Ernani et al., 1996), umidade (Cox & Barber, 1992), teor de argila (Cox, 1994; Huffman et al., 1996), teor de Ca (Akinremi & Cho, 1991) e formas de Fe (Hernández & Meurer, 1998).

O método de aplicação dos fertilizantes fosfatados, na superfície ou incorporado ao solo, não tem alterado a absorção de P e o rendimento das culturas em algumas situações (Muzilli, 1983; Klepker & Anghinoni, 1996), apesar da baixa mobilidade do P no solo. A boa eficiência do P aplicado sobre a superfície, provavelmente, está relacionada com o maior incremento na concentração de P na solução do solo nessa região, em consequência do aumento na percentagem de saturação dos sítios de adsorção, resultante da redução do contato do fertilizante com o solo. A localização de P, no entanto, diminui o volume de solo fertilizado com o qual as raízes entram em contato, o que pode prejudicar a absorção do nutriente (Zhang & Barber, 1992), especialmente em períodos de déficit hídrico.

Os fertilizantes fosfatados diferem, principalmente quanto à composição química, solubilidade e cátion acompanhante. Essas diferenças podem influir na

taxa de solubilização dos fosfatos e nas reações de precipitação e adsorção química de P nas regiões adjacentes aos grânulos ou partículas de fosfatos, onde a intensidade é alta, com reflexos na concentração de P na solução do solo, e com isso influir na eficiência de utilização pelas plantas e no rendimento das culturas (Ernani & Barber, 1991; Coutinho et al., 1991).

A dissolução do diamônio fosfato (DAP) eleva o pH ao redor dos grânulos (Akinremi & Cho, 1991; Ernani & Barber, 1991), e com isso diminui a adsorção química de P (Ernani e Barber, 1990; Ernani et al., 1996), a formação de precipitados do P com Fe e Al (Ernani & Barber, 1991) e a atividade do Al (Ernani & Barber, 1991).

A dissolução do superfosfato triplo (SFT), por outro lado, diminui o pH ao redor do grânulo, e com isso aumenta a adsorção de P e a formação de precipitados com Fe e Al (Figueiredo, 1985); como ele é um fosfato de cálcio, também pode originar precipitados de fósforo com cálcio (Akinremi & Cho, 1991). A disponibilidade de P a partir da aplicação de fosfatos solúveis depende, portanto, da reação que controla o suprimento de P à solução do solo (adsorção química ou precipitação), do pH ao redor do grânulo e do tipo de precipitado de fósforo que predomina em cada solo.

O comportamento dos fosfatos naturais é um pouco diferente porque eles dependem primeiramente da solubilização, a qual é favorecida pelo contato com o solo e pela presença de H⁺ (He et al., 1996). A partir dela, eles passam a ter o mesmo comportamento que os fosfatos solúveis, porém com menor intensidade, nas reações de precipitação, em razão das menores

concentrações de P nas microrregiões ao redor das partículas de fosfato. O pH do solo, especialmente das microrregiões ao redor dos grânulos de fertilizantes, é, portanto, um dos parâmetros de solo com grande influência na disponibilidade de P aos vegetais, por influenciar a solubilidade dos fosfatos naturais (He et al., 1996) e a magnitude das reações de adsorção e precipitação do fósforo adicionado ao solo, principalmente na forma de fosfatos solúveis.

Com a crescente utilização do sistema plantio direto, aumenta a importância do conhecimento da magnitude dessas reações, assim como da mobilidade de P no solo, pois os fertilizantes são aplicados sobre a superfície do solo, originando zonas com altas concentrações iônicas.

O presente trabalho objetivou avaliar a mobilidade do P e as alterações nas características químicas de um Latossolo Alumínico típico resultantes da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados sobre a superfície do solo, bem como o seu efeito no rendimento de massa seca e na absorção de P por plântulas de milho, em dois valores de pH.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa consistiu em dois experimentos realizados no ano de 1998, no Centro Agroveterinário da UDESC, em Lages (SC).

Um dos experimentos foi feito em câmara de crescimento, utilizando-se o milho como planta-teste e amostras de solo com estrutura deformada, coletadas no horizonte A de um Latossolo Bruno Alumínico Típico, que apresentava $\text{pH-H}_2\text{O} = 4,7$, $\text{pH-CaCl}_2 = 4,3$, $\text{Al}^{3+} = 17 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{P} = 2 \text{ mg kg}^{-1}$ Mehlich-1, $\text{argila} = 550 \text{ g kg}^{-1}$ e $\text{MO} = 40 \text{ g kg}^{-1}$.

Os tratamentos consistiram de um fatorial com três fertilizantes fosfatados (diamônio fosfato, superfosfato triplo e o fosfato natural ARAD), além de uma testemunha sem P, dois métodos de aplicação (sobre a superfície ou incorporado ao solo), e dois níveis de acidez (com e sem calcário). Três repetições foram distribuídas no delineamento experimental completamente casualizado.

Nos tratamentos com calagem, aplicou-se o equivalente a 10 t ha^{-1} de calcário dolomítico comercial, corrigido para PRNT 100%. A seguir, todas as unidades experimentais, com $3,0 \text{ kg}$ de solo seco cada, foram incubadas por 25 dias, em temperatura ambiente, com umidade de aproximadamente 80% da capacidade de retenção de água. Após esse período, as amostras de solo apresentaram $\text{pH-H}_2\text{O} = 5,7$ e foram transferidas para tubos de PVC, com 10 cm de diâmetro e 38 cm de altura, quando se aplicaram os tratamentos de P. O P foi aplicado na dose total de 80 mg kg^{-1} (187 mg kg^{-1} de P_2O_5); nos tratamentos com superfosfato triplo (SFT), fosfato natural e, na testemunha, aplicou-se a mesma

quantidade de N adicionado pelo DAP (90 mg kg^{-1} de N), na forma de uréia líquida. Cultivaram-se duas plantas de milho (Cargill 855) por unidade experimental, durante 21 dias após a emergência, em câmara de crescimento, ajustada para a temperatura de 28°C e umidade relativa do ar de 85%.

Para facilitar a separação do solo em camadas, nas unidades experimentais onde o P foi aplicado na superfície do solo, cada tubo (com 100 mm de diâmetro) foi construído, de cima para baixo, pela justaposição de três anéis com 1 cm de altura, dois com $2,5 \text{ cm}$, um com 10 cm , e o último com 20 cm . Nos tratamentos em que o P foi incorporado ao solo, cada tubo foi formado por um anel superior com 20 cm de altura (porção do solo em que os fertilizantes foram incorporados), seguido por três com 1 cm , dois com $2,5 \text{ cm}$, e o último com 10 cm . A parte inferior dos tubos foi vedada por uma tampa de PVC, e a superfície do solo foi coberta com plástico preto, para amenizar a perda de água por evaporação. Água destilada foi adicionada a cada dois dias, num volume de 50 ml por tubo.

Nas plantas de milho, determinaram-se a massa seca da parte aérea e a concentração de P no tecido, e foi calculada a quantidade de P absorvido. O tecido vegetal foi digerido com solução nitroperclórica (Tedesco et al., 1995) e a determinação do P feita em espectrofotômetro de emissão induzida por plasma (ICP). Nas amostras de solo, coletadas no final do experimento, em todas as profundidades delimitadas pelos anéis, determinaram-se pH, Ca, Mg e Al trocáveis e P extraível. O pH foi determinado em água e em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, numa relação solo/solvente de 1:1; Ca, Mg e Al foram extraídos com solução de KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e determinados por ICP; e o P foi extraído com solução de Mehlich-1 e com resina trocadora de ânions, sendo ambos determinados por colorimetria (Tedesco et al., 1995). Em todas as extrações, usou-se uma relação solo/solvente de 1:10.

O segundo experimento foi realizado com o objetivo de elucidar alguns resultados obtidos no experimento com plantas. Nele, tentou-se simular o efeito ocasionado por alguns fertilizantes no pH do solo das regiões adjacentes aos grânulos. Como as variações ocorrem apenas em microrregiões, e por isso são difíceis de ser quantificadas, optou-se por misturar o solo com uma quantidade extremamente grande de fertilizante com vistas em obter valores mensuráveis num volume expressivo de solo. Para isso, misturaram-se 200 g de uréia, SFT ou DAP com amostras de $1,0 \text{ kg}$ de solo (base seca). A seguir, as unidades experimentais, com três repetições, foram incubadas por 32 dias, em temperatura ambiente e com umidade de aproximadamente 80% da capacidade de retenção de água. Amostras para determinação do pH foram coletadas 1, 2, 4, 8, 16 e 32 dias após a aplicação dos tratamentos. O pH foi determinado, usando-se água como solvente, na relação 1:1. O solo utilizado foi o mesmo do experimento anterior, porém coletado aproximadamente seis meses após.

A análise estatística dos efeitos dos tratamentos sobre as variáveis consistiu, no experimento I, na análise da variância. A diferença entre as médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Duncan, a 5%. Os resultados referentes ao experimento II não foram analisados estatisticamente, observando-se apenas as tendências dos efeitos dos fertilizantes no pH-H₂O do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pH do solo não foi afetado pelos fertilizantes fosfatados nem pela sua forma de aplicação, em nenhuma profundidade (dados não apresentados). O Al trocável, entretanto, diminuiu nas camadas superficiais do solo, até, no máximo, três centímetros de profundidade, dependendo do fertilizante aplicado (Quadro 1). No solo onde foram aplicados SFT, ARAD, e na testemunha (sem P), os valores de Al foram menores nos 3 cm superficiais e não houve diferença entre os tratamentos. Onde se aplicou DAP, o Al diminuiu somente no centímetro superficial e, mesmo assim, foi maior que na testemunha. A diminuição do Al trocável no solo que recebeu os fertilizantes fosfatados poderia ter sido causada pela precipitação do Al com os fosfatos (Figueiredo, 1985; Akinremi & Cho, 1991), porque os fertilizantes não alteraram o pH médio do solo.

Entretanto, como o Al diminuiu também na testemunha, onde não se aplicou P, outro fenômeno aconteceu, possivelmente relacionado com a liberação de exsudatos a partir das raízes concentradas nessas camadas superficiais. Quando os fertilizantes foram incorporados ao solo, o Al trocável não foi afetado na camada fertilizada (20 cm), possivelmente pela diluição do efeito das reações pela mistura com o solo (dados não apresentados).

Os fertilizantes fosfatados alteraram os valores de Ca nas camadas superficiais, mas não os de Mg (Quadro 2). A aplicação de SFT e ARAD na superfície do solo aumentou o Ca trocável somente no centímetro superficial, porém apenas na ausência de calagem; o DAP não influenciou nos teores de Ca (Quadro 2). Para solos deficientes em Ca, portanto, os fosfatos de cálcio teriam a vantagem de suprir Ca. Para solos calcariados, ou com bom suprimento natural de Ca, no entanto, a eficiência dos fosfatos dependerá do tipo de precipitado de fósforo predominante, pois um aumento dos valores de Ca poderá resultar em maior precipitação desse nutriente com o fósforo (Akinremi & Cho, 1991).

A mobilidade de P no solo foi baixa, o que proporcionou grande acúmulo na superfície do solo. A aplicação dos fosfatos na superfície acumulou P até à profundidade de 3 cm, independentemente da calagem, e a maior mobilidade ocorreu no solo que recebeu SFT (Quadro 3). Na camada de 0-1,0 cm, o P variou de 3 mg kg⁻¹, na testemunha, até 430 mg kg⁻¹, no tratamento com SFT. Nessa camada, o P chegou a ser 140 vezes maior do que nas camadas de solo que não foram influenciadas pela adição dos fosfatos. Apesar da baixa mobilidade, o P aplicado sobre a superfície desceu alguns centímetros, possivelmente pela sua grande concentração em superfície, com provável saturação dos sítios de adsorção. Em condições de campo, onde o solo não é mobilizado, a descida de P deverá ser menor, considerando a maior densidade do solo no campo relativamente à do solo existente nos vasos.

A concentração de P variou com o tipo de fosfato aplicado. É provável que os maiores valores de P, onde se aplicou SFT, e nas unidades experimentais sem calcário relativamente às calcariadas, sejam devidos à maior absorção de P pelas plantas nos tratamentos com DAP e naqueles calcariados (Quadro 5), uma vez que as amostras de solo foram coletadas após o período de 21 dias de cultivo do milho.

Quadro 1. Teores de Al trocável, no tratamento sem calcário, considerando a aplicação dos fertilizantes fosfatados na superfície do solo

Fontes de P	Profundidade							Média
	0,0-1,0	1,0-2,0	2,0-3,0	3,0-5,5	5,5-8,0	8,0-18,0	18,0-38,0	
	mmolc kg ⁻¹							
Sem P	6 a B	9 b B	11 bB	16 cA	17 c	17 c	16 c	16
SFT	3 a B	10 b B	12 bcB	14 cdB	17 d	17 d	16 d	16
DAP	10 a A	19 cdA	19 cdA	17 bcdA	18 bcd	16 bc	15 b	15
ARAD	3 a B	7 b B	10 bcB	12 cdB	15 d	15 d	14 d	14

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, indicam ausência de diferença entre as fontes de P dentro da mesma profundidade; médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas, indicam ausência de diferença entre as profundidades dentro do mesmo tratamento de P; ausência de letras indica inexistência de diferença pelo teste de Duncan a 5%.

Quadro 2. Teores de Ca e Mg trocáveis em três profundidades do solo (0-1, 1,0-2,0 e 2,0-38,0 cm), considerando a aplicação dos fertilizantes fosfatados na superfície do solo e a pH do solo

Fontes de P	Ca			Mg		
	0,0-1,0	1,0-2,0	2,0-38,0	0,0-1,0	1,0-2,0	2,0-38,0
mmol. kg ⁻¹						
Sem calcário (pH-H ₂ O 4,7)						
Sem P	12 B	12	12	12	12	12
SFT	40 aA	18 b	12 b	15	12	12
DAP	13 B	10	11	16	11	12
ARAD	39 aA	19 b	11 b	11	11	11
Com calcário (pH-H ₂ O 5,7)						
Sem P	39 BC	41	43	38	40	43
SFT	45 aB	38 b	39 b	40	42	41
DAP	43 B	41	41	44	38	42
ARAD	53 aA	45 b	36 b	39	40	44

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas colunas, indicam ausência de diferença entre as fontes de P dentro da mesma profundidade; médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas linhas, indicam ausência de diferença entre as profundidades dentro do mesmo tratamento de P; ausência de letras indica inexistência de diferença pelo teste de Duncan a 5%.

Quadro 3. Teores de P extraível pelo método da resina, nas diferentes profundidades do solo, considerando a aplicação de fertilizantes fosfatados na superfície do solo

Profundidade	Sem calcário (pH-H ₂ O 4,7)				Com calcário (pH-H ₂ O 5,7)			
	DAP	SFT	ARAD	Sem P	DAP	SFT	ARAD	Sem P
cm	mg kg ⁻¹							
0,0-1,0	209 a	430 a	66 a	3	185 a	355 a	29 a	4
1,0-2,0	28 b	46 b	27 b	4	23 b	43 b	18 ab	5
2,0-3,0	10 c	17 c	6 c	3	10 bc	19 c	8 bc	5
3,0-5,5	6 c	8 cd	4 c	3	6 c	8 cd	3 c	5
5,5-8,0	4 c	5 cd	4 c	2	4 c	5 d	3 c	3
8,0-18,0	3 c	3 d	3 c	2	3 c	3 d	3 c	4
18,0-38,0	2 c	2 d	2 c	2	2 c	4 d	4 bc	4
Média	20 B	39 A	10 C	3 D	19 B	34 A	7 C	4 C

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, nas linhas, indicam ausência de diferença entre as fontes de P dentro da mesma profundidade; médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas colunas, indicam ausência de diferença entre as profundidades dentro do mesmo tratamento de P; ausência de letras indica inexistência de diferença pelo teste de Duncan a 5%.

Os menores valores de P no solo ocorreram onde se aplicou ARAD, decorrente da menor solubilização desse fosfato natural relativamente aos fosfatos solúveis. Quando os fosfatos foram incorporados ao solo, o P extraível não diferiu entre as fontes de P (Quadro 4), ou entre as profundidades, graças à diluição do P aplicado na camada de 20 cm e à alta capacidade de retenção de P por esse solo (Ernani et al., 1996).

O acúmulo de P nos primeiros centímetros superficiais, decorrente da aplicação dos fosfatos

sobre a superfície, alerta para a importância da existência de umidade e de raízes nesses locais, as quais são estimuladas pela presença de P (Lu & Miller, 1994; Zhang & Barber, 1992). Além disso, mostra que, em virtude da alta concentração de P nessas regiões, as reações de precipitação devem assumir maior importância que as de adsorção química. Mostra, ainda, a importância da coleta de amostras de solo em pequenas profundidades as quais revelam diferenças que não aparecem quando camadas mais espessas de solo são amostradas.

Quadro 4. Teores de P extraível pelos métodos de Mehlich-1 e da resina trocadora de ânions, considerando o método de aplicação dos fertilizantes fosfatados

Fonte de P	Resina		Mehlich-1	
	Superficial	Incorporado	Superficial	Incorporado
	mg kg ⁻¹			
Sem P	3,1 d	3,1	2,3 d	2,8
SFT	15,4 a	3,3	13,2 b	3,4
DAP	8,8 b	3,0	7,9 c	4,1
ARAD	5,0 cB	3,0	22,0 aA	4,8

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, nas colunas, indicam ausência de diferença entre os tratamentos de P dentro do mesmo método de aplicação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, indicam ausência de diferença entre as fontes de P; ausência de letras indica inexistência de diferença pelo teste de Duncan a 5%. Valores médios de dois níveis de calcário, sete profundidades e três repetições.

Os métodos de extração de P do solo quantificaram valores diferentes, principalmente para o fosfato natural (Quadro 4). O solo que recebeu o fosfato natural de ARAD sobre a superfície apresentou aproximadamente 4,5 vezes mais P pelo método de Mehlich em relação ao método da resina, isso porque o primeiro utiliza uma solução extratora ácida, que dissolve as partículas de fosfato de cálcio do fertilizante que ainda não haviam dissolvido no solo, superestimando o P para as plantas. O método da resina trocadora de ânions, diferentemente, quantifica apenas as frações mais lábeis do P do solo, que já dissolveram. Para os fosfatos solúveis, o método de extração não influenciou os valores de P no solo (Quadro 4).

A calagem aumentou o rendimento de massa seca do milho e a absorção de P, bem como influenciou a eficiência dos métodos de aplicação dos fosfatos (Quadro 5). Nos tratamentos que receberam calcário, o rendimento e a absorção de P não foram influenciados pelos métodos de aplicação dos fertilizantes fosfatados, possivelmente, pelo aumento na disponibilidade do P nativo causado pela calagem (Ernani et al., 1996; Ernani et al., 2000), pela menor adsorção química do P incorporado (Anghinoni, 1992) e pela eliminação da fitotoxidez do Al (Ernani & Barber, 1990; 1991; Santos et al., 1996).

Na ausência de calcário, entretanto, a aplicação dos fosfatos na superfície do solo foi mais eficiente em aumentar o rendimento de massa seca e a absorção de P do que a incorporação, provavelmente pela menor retenção de P pela fase sólida (Anghinoni, 1992), dado o menor contato dos fertilizantes com o solo. A aplicação localizada dos fosfatos satura os sítios de adsorção de P nos centímetros superficiais, e, com isso, proporciona alta concentração de P na solução do solo nessas zonas, favorecendo a absorção de P pelas raízes que se encontram nesses locais (Castilhos & Anghinoni, 1988; Lu & Miller, 1994).

Os efeitos benéficos da localização de P no solo, entretanto, parecem diminuir com o tempo, mesmo dentro do ciclo de desenvolvimento de uma cultura (Anghinoni, 1992), razão por que a eficiência da localização dependerá de quanto P a cultura absorve nos períodos iniciais de desenvolvimento. Em experimentos de campo, Muzilli (1983), e Klepker & Anghinoni (1996) observaram que o rendimento de culturas anuais não sofreu alteração com a aplicação dos fertilizantes fosfatados.

A eficiência dos fosfatos em aumentar o rendimento de matéria seca variou com o pH do solo (calagem) e com o método de aplicação (Quadro 5). Na presença de calcário (pH 5,7), o DAP foi o fertilizante fosfatado mais eficiente em aumentar o rendimento de massa seca do milho, nos dois métodos de aplicação de P, seguido pelo SFT, e este pelo ARAD, que não diferiu da testemunha. Na ausência de calcário (pH 4,7), quando os fertilizantes foram aplicados na superfície do solo, os maiores rendimentos foram obtidos com o DAP e com o SFT, seguido pelo ARAD que não diferiu do SFT, e, por último, pela testemunha, sem P; quando eles foram incorporados ao solo, o rendimento foi muito baixo, possivelmente limitado pela alta fitotoxidez de Al e pela grande capacidade de adsorção de P por esse solo, e nenhum fertilizante aumentou o rendimento de massa seca do milho. A boa performance do ARAD no solo sem calcário relativamente ao solo calcariado deve-se provavelmente à maior dissolução do fosfato natural em condições de baixo pH.

A maior eficiência do DAP em aumentar o rendimento de matéria seca de milho relativamente aos demais fosfatos provavelmente está relacionada com a elevação do pH ao redor de seus grânulos, fenômeno esse anteriormente observado por Ernani & Barber (1991). No experimento sem plantas, onde se tentou simular o efeito dos fertilizantes sobre o pH do solo das regiões adjacentes aos grânulos,

Quadro 5. Rendimento de massa seca do milho e P absorvido, considerando o pH do solo e o método de aplicação de fertilizantes fosfatados

Fosfato	Sem calcário (pH 4,7)		Com calcário (pH 5,7)		Média
	P superfície	P incorporado	P superfície	P incorporado	
----- Massa seca (g vaso ⁻¹) -----					
Sem P	0,48 c	0,48	0,65 c	0,65 c	0,53 c
DAP	1,22 a	0,46	1,72 a	1,76 a	1,29 a
SFT	0,95 ab	0,70	1,26 b	1,23 b	1,04 b
ARAD	0,85 b	0,57	0,74 c	0,74 c	0,73 c
Média métodos	0,87 A	0,55 B	1,09	1,09	
Média calagem	0,71 B		1,09 A		
----- P absorvido (mg vaso ⁻¹) -----					
Sem P	0,65 b	0,65	1,02 b	0,90 c	0,89 c
DAP	2,36 a	1,15	2,39 a	2,73 a	2,15 a
SFT	1,32 b	1,12	1,84 a	1,76 b	1,52 b
ARAD	1,20 b	0,82	1,14 b	1,13 bc	0,99 c
Média métodos	1,38 A	0,93 B	1,60	1,63	
Média calagem	1,16 B		1,62 A		

Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas, nas linhas, indica diferença entre métodos de aplicação ou de calagem, e minúsculas, nas colunas, indicam diferença entre fontes de P dentro de cada método de aplicação; ausência de letras indica inexistência de diferença pelo teste de Duncan a 5%.

verificou-se que a aplicação de uma alta dose de fertilizantes alterou o pH do solo. A uréia e o DAP elevaram o pH de 5,2 para 7,0 e 6,8, respectivamente, e o SFT baixou o pH para 4,0, na média das seis determinações, realizadas nos 32 primeiros dias após a mistura dos fertilizantes com o solo (Figura 1). Com a uréia e o DAP, o pH oscilou com o tempo: diminuiu do primeiro para o segundo dia e, a partir daí, aumentou até o décimo sexto dia, quando voltou a diminuir, porém sempre mantendo-se mais alto que no solo que não recebeu nenhum fertilizante.

Na testemunha e no solo tratado com SFT, o pH foi aproximadamente constante ao longo dos 32 dias avaliados. A hidrólise da uréia produz hidroxilas e bicarbonatos, que reagem com o H⁺ nas regiões adjacentes aos grânulos, elevando inicialmente o pH do solo em contato com a respectiva solução. Posteriormente, com a nitrificação, o pH baixa, e isso ocorreu a partir do décimo-sexto dia após a mistura dos fertilizantes com o solo. A dissociação do DAP também consome H⁺ inicialmente (Ernani & Barber, 1990; 1991), pois algumas moléculas de HPO₄²⁻ transformam-se em H₂PO₄⁻ nos valores de pH comumente encontrados em solos. Com o SFT, ocorre o contrário, pois sua dissolução libera íons H⁺ a partir do H₂PO₄⁻ (Figueiredo, 1985). Em condições de campo, essas alterações de pH ocorrem somente nas regiões adjacentes aos grânulos, mas podem ser importantes, principalmente nos períodos iniciais subseqüentes à aplicação dos fertilizantes, onde a magnitude das reações é grande.

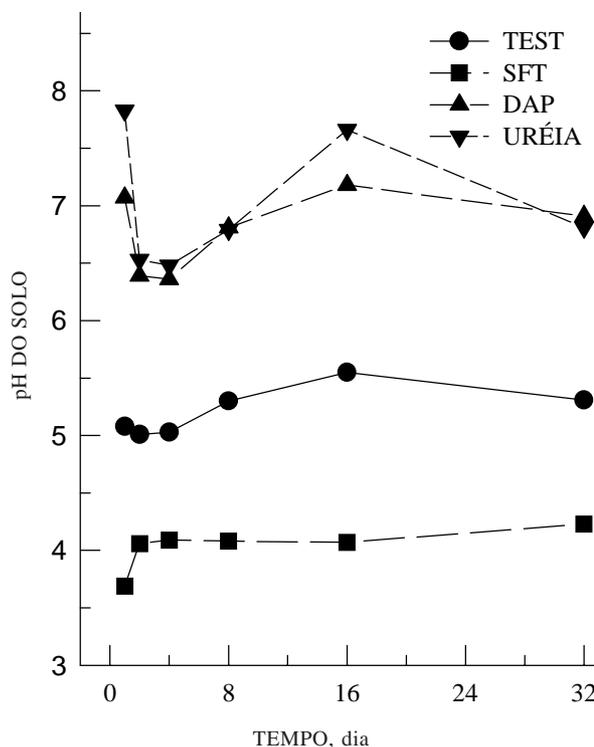


Figura 1. Valores de pH do solo em diferentes épocas após a mistura de uma alta dose (20% em peso) de superfosfato triplo (SFT), diamônio fosfato (DAP), ou uréia com um Latossolo Bruno. Média de três repetições.

CONCLUSÕES

1. O pH do solo influenciou a eficiência dos métodos de aplicação e das fontes de fósforo.
2. Em condições de alta capacidade de retenção de P, a aplicação localizada dos fosfatos foi mais eficiente que a incorporação dos fosfatos ao solo.
3. A aplicação dos fertilizantes fosfatados sobre a superfície concentrou o P, diminuiu Al trocável até, no máximo, três centímetros de profundidade.
4. No estágio inicial de desenvolvimento, sem limitação hídrica, o milho demonstrou habilidade em absorver o P aplicado sobre a superfície do solo, apesar da baixa mobilidade vertical desse nutriente.

LITERATURA CITADA

- AKINREMI, O.O. & CHO, C.M. Phosphate transport in calcium-saturated systems: II. Experimental results in a model system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1282-1287, 1991.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:349-353, 1992.
- CASTILHOS, D.D. & ANGHINONI, I. Influência do suprimento de fósforo a diferentes frações do sistema radicular sobre o comportamento do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:263-267, 1988.
- COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S. & SITTA, D.S.X. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 26:1393-1399, 1991.
- COX, F.R. Predicting increases in extractable phosphorus from fertilizing soils of varying clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1249-1253, 1994.
- COX, M.S. & BARBER, S.A. Soil phosphorus level for equal P uptake from four soils with different water contents at the same water potential. *Plant Soil*, 143:93-98, 1992.
- ERNANI, P.R. & BARBER, S.A. Comparison of P-availability from monocalcium and diammonium phosphates using a mechanistic nutrient uptake model. *Fert. Res.*, 22:15-20, 1990.
- ERNANI, P.R. & BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. *Pesq. Agropec. Bras.*, 26:1309-1314, 1991.
- ERNANI, P.R.; FIGUEIREDO, O.R.A.; BECEGATO, V. & ALMEIDA, J.A. Decréscimo da retenção de fósforo no solo pelo aumento do pH. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:159-162, 1996.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. & CAMILLO, R.J. Influencia da combinação de fósforo e calcário no rendimento de. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:537-544, 2000.
- FIGUEIREDO, O.A.R. Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um solo Latossolo Bruno. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 85p. (Tese de Mestrado)
- HE, Z.L.; BALIGAR, V.C.; MARTENS, D.C.; RITCHEY, K.D. & KEMPER, W.D. Factors affecting phosphate rock dissolution in acid soil amended with liming materials and cellulose. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1596-1601, 1996.
- HERNANDEZ, J. & MEURER, E. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:223-230, 1998.
- HUFFMAN, S.A.; COLE, C.V. & SCOTT, N.A. Soil texture and residue addition affects on soil phosphorus transformation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1095-1101, 1996.
- KLEPKER, D. & ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos do solo. *Pesq. Agropec. Gaúcha*, 2:79-86, 1996.
- LU, S. & MILLER, M.H. Prediction of phosphorus uptake by field-grown maize with the Barber-Cushman model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:852-857, 1994.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:95-102, 1983.
- SANTOS, J.C.P.; KAMINSKI, J.; ERNANI, P.R. & MAFRA, A.L. Rendimento de massa seca e absorção de fósforo pelo milho afetado pela aplicação de fósforo, calcário e incubação com fungos micorrízicos. *Ci. Rural*, 26:63-67, 1996.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; WOLKWEISS, S.J. & BOHNEN, H. Análise do solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico de Solos, 5)
- ZHANG, J. & BARBER, S.A. Mayze root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:819-822, 1992.