



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Brasil

Souza Nunes, Rafael de; Martinhão Gomes de Sousa, Djalma; Goedert, Wenceslau J.; Vivaldi, Lúcio
José

Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, núm. 3, junio, 2011, pp. 877-888

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180219357022>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

DISTRIBUIÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO EM RAZÃO DO SISTEMA DE CULTIVO E MANEJO DA ADUBAÇÃO FOSFATADA⁽¹⁾

**Rafael de Souza Nunes⁽²⁾, Djalma Martinhão Gomes de Sousa⁽³⁾,
Wenceslau J. Goedert⁽⁴⁾ & Lúcio José Vivaldi⁽⁵⁾**

RESUMO

O sistema de cultivo e o manejo da adubação fosfatada influenciam a disponibilização do P no solo, seu acesso pelas plantas e, por fim, a produção das culturas. Em razão disso, há necessidade de se avaliar a distribuição do P no perfil do solo em experimentos de longa duração, para que se possa compreender o impacto de cada sistema de cultivo e manejo da adubação nesse processo. Foi utilizado um experimento localizado na Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF, em Latossolo Vermelho muito argiloso, com teor de P muito baixo no início do experimento, cultivado por 14 anos com as culturas de soja e milho no verão e milheto como planta de cobertura nas seis últimas safras de inverno, recebendo 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, aplicados no sulco de semeadura ou a lanço na superfície, sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD). Foi avaliada a distribuição do P em sete camadas de solo (0 a 2,5; 2,5 a 5; 5 a 10; 10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; e 40 a 50 cm), utilizando o extrator Bray 1. No 14º ano de cultivo foram utilizados os dados de rendimento de grãos de soja. Os resultados foram analisados estatisticamente, para comparações quanto à distribuição do P no perfil do solo e ao rendimento de grãos. A distribuição de P extraível no solo após 14 anos de cultivo é influenciada pela fonte e pelo modo de aplicação do fertilizante fosfatado, até 10 cm de profundidade no SPD e até 20 cm de profundidade no SPC. No SPC há leve gradiente em profundidade, enquanto no SPD há forte gradiente principalmente para aplicações a lanço, sendo os maiores teores de P no perfil analisado encontrados na camada de 0-2,5 cm para os dois modos de aplicação. O SPD apresenta maiores

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de mestrado apresentada pelo primeiro autor ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade de Brasília – UnB. Recebido para publicação em março de 2010 e aprovado em março de 2011.

⁽²⁾ Doutorando do PPGA da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília – UnB. Campus Universitário Darcy Ribeiro, Caixa Postal 04508, CEP 70910-900 Brasília (DF). E-mail: rafael.souza_nunes@yahoo.com.br

⁽³⁾ Pesquisador, Embrapa Cerrados. BR 020, km 18, CEP 73310-970, Planaltina (DF). E-mail: dmgsousa@cpac.embrapa.br

⁽⁴⁾ Professor Associado, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, UnB. E-mail: goedert@unb.br

⁽⁵⁾ Professor Associado, Departamento de Estatística, UnB. E-mail: vivaldi@unb.br

teores de P até 10 cm de profundidade, porém menores teores na camada de 10–20 cm, em comparação com o SPC. Apesar do efeito do manejo da adubação fosfatada na distribuição do P no solo, o rendimento de grãos de soja no 14º ano foi alterado apenas pelo sistema de cultivo, tendo o solo sob SPD produzido 15,5 % mais grãos do que o SPC.

Termos de indexação: fontes de fósforo, modos de aplicação de fósforo, sistema de preparo convencional, plantio direto, Cerrado, P Bray 1.

SUMMARY: *PHOSPHORUS DISTRIBUTION IN SOIL AS AFFECTED BY CROPPING SYSTEMS AND PHOSPHATE FERTILIZATION MANAGEMENT*

Cropping systems and management of phosphate fertilization affect P availability in the soil, its accessibility for plants and finally, crop yields. This calls for an evaluation of P distribution in the soil profile, in long-term experiments, to understand the impact of each cropping system and fertilization management on this process. An area of Embrapa Cerrados, in Planaltina - DF, in an Oxisol, with very low P content at the beginning of the experiment, was cultivated for 14 years with soybean and corn in the summer and millet as winter cover crop in the last six seasons; fertilization consisted of 80 kg ha⁻¹ yr⁻¹ of P₂O₅, as triple superphosphate or phosphate rock, applied in seed furrows or broadcast, in conventional tillage (CT) or no-tillage (NT). Phosphorus distribution was evaluated in seven soil layers (0–2.5 cm, 2.5–5 cm, 5–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm, and 40–50 cm) using the extractor Bray 1. In the 14th year of cultivation, the soybean yield data were used. The results were statistically analyzed to compare P distribution in the soil profile and the yield. The distribution of soil-extractable P after 14 years of cultivation was influenced by the source and application form of phosphate fertilizer down to a depth of 10 cm in NT and to 20 cm in CT. Under CT, there was a slight depth gradient, while under NT there was a strong gradient, primarily for broadcast applications. Highest P levels were found in the 0–2.5 cm layer, for both application forms. P contents were higher down to 10 cm, but in the 10–20 cm layer contents were lower than in CT. Despite the management effect of phosphorus fertilization on soil P distribution, soybean grain yield in the 14th year was affected by the cropping system only, and the soil under NT produced 15.5 % more grain than the CT.

Index terms: phosphorus sources, phosphorus placement, conventional tillage, no-tillage, Cerrado, P Bray 1.

INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, a produção de grãos brasileira, que era realizada sob sistema de preparo convencional (SPC), passou a ser gradativamente conduzida no sistema plantio direto (SPD), devido a inúmeras vantagens do manejo conservacionista, como, por exemplo, acúmulo de matéria orgânica (Bayer et al., 2000; Costa et al., 2008), menor temperatura e maior umidade volumétrica de camadas superficiais (Costa et al., 2003) e redução da erosão (Hernani et al., 1999), proporcionando assim nova dinâmica de fertilidade do solo (Nicolodi et al., 2008).

No SPD, uma importante alteração que ocorre é o gradiente de concentração no perfil (Nunes et al., 2008), devido à não mobilização de fertilizantes e corretivos aplicados nas camadas superficiais (DeMaria et al., 1999), bem como à ciclagem de

nutrientes (Santos & Tomm, 2003). Uma vez que o P apresenta baixa mobilidade no solo (Barber, 1984) e baixíssima disponibilidade nos solos oxídicos (Novais et al., 2007), isso pode alterar o suprimento das plantas, já que a absorção pelas raízes é dependente dos teores de P, bem como do volume de solo adubado (Anghinoni, 1992; Model & Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1995).

Para que ocorra adequada absorção de P, crescimento e produtividade das culturas e, por fim, elevada eficiência dos fertilizantes fosfatados, estes devem ser aplicados de maneira adequada no solo, permitindo sua melhor localização em relação às raízes das plantas (Anghinoni & Barber, 1980), assim como minimização da exposição do P ao fenômeno da fixação promovido por óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Sousa & Volkweis, 1987b).

Os modos de aplicação de P mais utilizados para produção de grãos são a lanço na superfície com ou

sem incorporação, no sulco de semeadura e em faixas (Sousa et al., 2004). O manejo comum da adubação fosfatada na região do Cerrado constitui-se de aplicações no sulco de semeadura de fontes solúveis de P. Apesar de ampliar o gradiente natural de P no perfil do solo, principalmente sob SPD, aplicações de adubos fosfatados na superfície tornam-se uma interessante alternativa em sistemas de produção que se beneficiem com maior rapidez no plantio, a qual pode ser obtida com a adubação antecipada ou após este. Isso permitiria o plantio apenas com as sementes ou quantidade menor de fertilizante, reduzindo o tempo demandado para abastecer as plantadeiras e possibilitando aumentar a velocidade de trabalho destas, por estarem mais leves. Sistemas de produção de grãos de soja e milho em que há possibilidade de realizar uma segunda safra de verão se beneficiariam do menor tempo gasto nas operações de plantio, tanto na primeira como na segunda safra, favorecendo a maior utilização da água pela cultura antes do final da estação chuvosa.

Os fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água são os mais usados na agricultura mundial devido à sua maior eficiência agronômica (Bolland & Bowden, 1982), para quaisquer condições de solo e de cultura, correspondendo a 95 % do P_2O_5 utilizado na agricultura brasileira em 2008 (ANDA, 2009). No entanto, é também bastante conhecido que essas fontes de elevada solubilidade, quando adicionadas aos solos tropicais ácidos e de alta capacidade de fixação de P, são rapidamente convertidas em formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (Bolland, 1985; Kordörfer et al., 1999; Ghosal et al., 2003; Prochnow et al., 2004).

Uma alternativa cada vez mais utilizada são as fontes naturais reativas, que promovem solubilização gradual do P, limitando a adsorção específica pelas argilas (Novais et al., 2007) e podendo proporcionar maior eficiência do fertilizante, conforme observaram Sousa et al. (2008), avaliando o efeito residual de fontes de P após seis cultivos sucessivos com soja.

Desse modo, os distintos sistemas de cultivo e manejos do fertilizante fosfatado contribuirão, de forma significativa, para o acesso do P pela planta e, por fim, para a produção das culturas, uma vez que o P é um importante modulador da produção.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição de P no perfil do solo cultivado por 14 anos com rotação soja-milho em função do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada e sua relação com o rendimento de grãos de soja no 14º cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental da Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF (latitude de 15° 36' S e longitude de 47° 42' W), altitude de

1.014 m, com clima Cwa, precipitação pluvial média anual de 1.570 mm e temperatura média anual de 21,3 °C. O relevo caracteriza-se como suave ondulado e a vegetação original é o Cerrado. Trata-se de um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso (64 % de argila), com teor de P extraível por Mehlich-1 muito baixo (1,0 mg dm⁻³ na camada de 0 a 20 cm), por ocasião da instalação do experimento, em setembro de 1994.

Antes da instalação do experimento, a área foi desmatada em 1976, permanecendo sem uso até 1985, quando se procedeu ao preparo do solo, à aplicação de calcário dolomítico para elevar a 50 % a saturação por bases e fez-se o cultivo consecutivo com mucunapreta (*Mucuna pruriens*), guandu (*Cajanus cajan*) e crotalária (*Crotalaria juncea*) nas safras 1985/86, 1986/87 e 1987/88, respectivamente; após esse período, a área permaneceu sob vegetação espontânea até 1994, quando se estabeleceu o experimento.

Antes do primeiro cultivo, foram aplicados, a lanço e incorporados, calcário dolomítico para elevar a 50 % a saturação por bases, K, S e micronutrientes, segundo recomendações de Sousa & Lobato (2004b). As sementes de soja foram inoculadas anualmente com 500 g de inoculante turfoso para cada 50 kg de sementes, juntamente com aplicação de 2 g de Co e 20 g de Mo para cada 50 kg de sementes. Também foram efetuadas adubações anuais de manutenção, a lanço, com 80 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de KCl, 30 kg ha⁻¹ de S na forma de gesso, além de, para o milho, 30 kg ha⁻¹ de N no sulco de semeadura e duas coberturas de 60 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, segundo Sousa & Lobato (2004b). A adubação anual com P foi feita na dose de 80 kg ha⁻¹ de P_2O_5 ; a fonte e o modo de aplicação de P variaram de acordo com cada tratamento. A soja (*Glycine max*) foi cultivada nos nove primeiros anos; o milho (*Zea mays*), no décimo ano; e, nos seguintes, houve a rotação entre milho e soja. Os cultivos de soja e milho receberam irrigação suplementar por aspersão em situações de seca durante a estação chuvosa – fenômeno comum na região e denominado “veranico”. A irrigação era definida com base em tensiómetros instalados nas parcelas a 20 cm de profundidade, quando estes apresentavam leitura maior que 45 cbar. O milheto (*Pennisetum glaucum*) foi utilizado como cobertura no inverno após o nono cultivo, sendo semeado após a colheita da soja ou milho, recebendo irrigação suplementar para desenvolvimento sem limitação de água, e roçado no início da maturação fisiológica.

Para realização deste trabalho, foram selecionados oito tratamentos: fosfato natural reativo de Gafsa - FNR e SFT, aplicados no sulco de semeadura e a lanço na superfície na dose de 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P_2O_5 , sob sistema de preparo convencional - SPC (constituído de uma aração até 20 cm de profundidade com arado de discos e uma grade niveladora antes do plantio da cultura de verão) e plantio direto - SPD. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao

acaso com parcelas subdivididas, com os sistemas de cultivo (SPC e SPD) nas parcelas (16 x 8 m) e, nas subparcelas, as fontes de P (FNR e SFT) e os modos de aplicação (sulco e lanço), distribuídos aleatoriamente dentro de cada uma delas, com três repetições. O FNR continha 28,2 % de P_2O_5 total, dos quais 44 % eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2 %. O SFT continha 47,6 % de P_2O_5 total, dos quais 92 % eram solúveis em solução de ácido cítrico a 2 %.

A aplicação dos fertilizantes fosfatados e a semeadura das culturas foram realizadas da seguinte forma: após a abertura do sulco com plantadeira sem os carrinhos que fecham os sulcos, aplicou-se a dose de P, utilizando distribuidor de precisão com tração humana, individualmente, em cada linha das parcelas com adubação no sulco. Os adubos foram cobertos com um pouco de solo utilizando-se rastelos e, em seguida, distribuíram-se as sementes. No caso do milho, a distribuição foi manual, com duas sementes por ponto e posterior desbaste de uma delas. Para a cultura da soja, foi utilizado semeador de precisão com tração humana, individualmente em cada linha das parcelas e regulando a densidade de sementes de acordo com a recomendação da variedade. Após a distribuição, as sementes foram cobertas com um pouco de solo com uso de rastelo e, em seguida, as parcelas com aplicação de P a lanço na superfície foram adubadas manualmente. No caso do milheto, foi utilizada semeadora tratorizada, uma vez que não se utilizavam fertilizantes nesse processo.

As dimensões das subparcelas experimentais foram de 8 x 4 m (32 m^2 de área), com espaçamento entre linhas de 0,50 m para a soja, 0,80 m para o milho e 0,20 m para o milheto. A área útil de colheita consiste de 15 m^2 para a soja e 12 m^2 para o milho, localizados na porção central das subparcelas. A colheita de soja e milho foi feita manualmente, e os resíduos vegetais, picados e devolvidos a cada parcela. A avaliação da produção de matéria seca de parte aérea de milheto foi feita amostrando-se 2 m^2 por parcela (duas avaliações com quadrado de 1 m^2), imediatamente antes da roçagem.

Em todos os anos foram amostrados parte aérea de milheto no momento da roçagem, grãos de soja e milho; e no 14º ano de cultivo, folhas de soja no momento de pleno florescimento, que foram analisados quanto aos teores de P por digestão úmida com $HNO_3 + HClO_4$ (3:1) (Embrapa, 1999). A quantidade de P residual no solo após os 14 cultivos da área foi calculada pela diferença entre a quantidade de P adicionada nesse período (1.120 kg ha^{-1} de P_2O_5) e a quantidade total exportada pelos grãos, obtida a partir da produção de grãos e do teor de P nos grãos. A quantidade de P depositada no solo pela palhada de milheto foi determinada a partir da produção de matéria seca e teor de P na matéria seca. A quantidade de P depositada no solo pelos restos vegetais de parte aérea de soja e milho foi calculada com base em um índice médio de exportação de P nos grãos de soja e milho de

85 % do P total absorvido (Embrapa, 1986; Coelho et al., 2004). Assim, a quantidade total de P exportada pelos grãos, determinada com base na produção de grãos e no teor de P nos grãos, foi considerada como 85 % do P total absorvido pela planta, tendo os 15 % restantes sido calculados e considerados como restos vegetais de parte aérea depositados no solo.

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2008, após a roçagem do milheto, com trado de 5 cm de diâmetro, em sete camadas (0 a 2,5; 2,5 a 5; 5 a 10; 10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; e 40 a 50 cm), sendo uma amostra composta por cada parcela do experimento. Para os tratamentos de adubação a lanço, foram tomadas 20 subamostras para cada amostra composta, coletadas aleatoriamente na área útil das parcelas. Quanto aos tratamentos de adubação no sulco, cada amostra composta foi formada por 30 subamostras dirigidas, obtidas da seguinte maneira: escolheram-se seis locais dentro de cada parcela e, em cada local, foram coletadas cinco subamostras perpendiculares à linha da cultura, sendo uma na linha, uma no centro de cada entrelinha e uma no ponto médio entre a linha e o centro de cada entrelinha. Também foi realizada amostragem em área de cerrado nativo distante 50 m do experimento, nas mesmas profundidades, coletando-se três amostras compostas formadas por 20 subamostras cada, coletadas aleatoriamente.

Depois de coletadas, as amostras foram secas ao ar, maceradas e passadas em peneira de 1 mm. Foi então realizada a determinação do P extraível pelo extrator Bray 1 ($HCl\ 0,025N + NH_4F\ 0,03\ N$), conforme descrito por Bray & Kurtz (1945), considerado o mais adequado para avaliação de áreas que receberam recentes adubações com FNR (Smith et al., 1957; Rajj & Diest, 1980; Kaminski, 1983; Sousa & Rein, 2009).

Para realização dos cálculos de estoque de P extraível, foi determinada a densidade do solo nos tratamentos adubados com SFT no sulco de semeadura sob SPC e SPD, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Uma vez que em todas as parcelas o procedimento de abertura de sulco é o mesmo, diferindo apenas quanto ao que é colocado no sulco (adubo e semente, nos tratamentos com aplicação no sulco, ou apenas semente, nos tratamentos com aplicação a lanço), considerou-se que a análise de densidade realizada somente nos tratamentos com aplicação de SFT no sulco, no SPC ou SPD, seria representativa da densidade tanto dos tratamentos com SFT aplicado a lanço quanto do FNR aplicado no sulco e a lanço, para cada sistema. Foi utilizado o método do anel volumétrico (Embrapa, 1997) e amostrados quatro pontos por parcela, sendo os dados de cada parcela uma média aritmética entre eles. Os valores médios obtidos nas parcelas experimentais para as camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm foram, respectivamente, de 0,98, 0,99, 1,02 e 1,06 g cm^{-3} para o SPC e 0,92, 1,00, 1,02 e 1,02 g cm^{-3} para o SPD.

No tocante às avaliações de produção de grãos e P no solo, como uma média de todas as camadas de solo, foi utilizado o seguinte modelo de efeito misto:

$$Y_{ijk} = \mu + B_j + S_i + \text{Erro}_{ij} + F_k + A_l + (FA)_{kl} + (SF)_{ik} + (SA)_{il} + (SFA)_{ikl} + \text{Erro}_{ijkl}$$

em que: μ = média geral dos dados; B = bloco ($j = 1,2,3$); S = sistema de preparo ($i = 1,2$); F = fonte de P ($k = 1,2$); A = modo de aplicação ($l = 1,2$); Erro = erro experimental.

Nas avaliações de distribuição de P no solo foi utilizado o seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_j + S_i + \text{Erro}_{ij} + F_k + A_l + (FxA)_{kl} + (SF)_{ik} + (SA)_{il} + (SFA)_{ikl} + \text{Erro}_{ijkl} + P_m + (PS)_{im} + P_F k_m + P_A l_m + P_{FA} klm + P_{SF} ikm + P_{SA} ilm + P_{SFA} iklm + \text{Erro}_{ijklm}$$

em que: μ = média geral dos dados; B = bloco ($j = 1,2,3$); S = sistema de preparo ($i = 1,2$); F = fonte de P ($k = 1,2$); A = modo de aplicação ($l = 1,2$); P = profundidade ($m = 1,2,3,4,5,6,7$); Erro = erro experimental.

A análise de variância foi feita considerando o modelo misto de máxima verossimilhança restrita via PROC MIXED do SAS 9.1; quando esta apontou significância, o teste de hipótese de Student (t) ($p < 0,05$) foi usado para distinção das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da implantação do experimento o solo apresentava teor de P extraível por Bray 1 de $1,6 \text{ mg dm}^{-3}$ na camada de 0 a 20 cm, o qual foi considerado extremamente baixo segundo Embrapa (1982), que classificou os teores de P extraível por Bray 1 no mesmo solo utilizado no presente trabalho como extremamente baixo ($< 2,0 \text{ mg dm}^{-3}$), muito baixo ($2,1\text{--}4,0 \text{ mg dm}^{-3}$), baixo ($4,1\text{--}8,0 \text{ mg dm}^{-3}$), médio ($8,0\text{--}12,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e alto ($> 12,0 \text{ mg dm}^{-3}$), em função dos rendimentos relativos obtidos ($< 25\%$, $26\text{--}50\%$, $51\text{--}70\%$, $41\text{--}80\%$ e $> 80\%$, respectivamente). Além disso, os teores de P da área nativa de Cerrado nas camadas de 0 a 2,5 cm, 2,5 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm, 20 a 30, 30 a 40 e 40 a 50 cm foram de $3,1 \text{ mg dm}^{-3}$, $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$, $1,4 \text{ mg dm}^{-3}$, $1,2 \text{ mg dm}^{-3}$, $0,9$, $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. Dessa forma, eram esperados aumentos nos teores de P extraível do solo e respostas das culturas, decorrentes da adubação fosfatada dos diversos tratamentos propostos no experimento.

Para avaliar o efeito dos tratamentos (fonte de P, modo de aplicação, sistema de cultivo) e suas interações na distribuição de P extraível no perfil do solo, destacaram-se as interações triplas entre fonte de P,

sistema de cultivo e profundidade e entre modo de aplicação, sistema de cultivo e profundidade, além da interação quádrupla entre fonte de P, modo de aplicação, sistema de cultivo e profundidade, todas altamente significativas ($p < 0,01$).

A distribuição de P extraível no perfil do solo após 14 anos de cultivo em função do sistema de cultivo e da fonte do fertilizante fosfatado é apresentada na figura 1.

Observa-se que no SPC as diferenças entre SFT e FNR ocorrem até 20 cm, que é a profundidade até onde o fertilizante é incorporado pelo arado de discos. Por sua vez, no SPD a adubação fosfatada por 14 anos com SFT ou FNR provocou alterações apenas nos primeiros 10 cm. Além disso, observa-se que o SFT proporcionou maiores teores em comparação com o FNR até 20 cm no SPC e até 10 cm no SPD. Isso se justifica pela dinâmica de reação no solo dessas duas fontes: o SFT, uma fonte solúvel de P, dissolve-se rapidamente no solo e disponibiliza prontamente esse nutriente para as plantas (Bolland & Bowden, 1982), enquanto o FNR, uma fonte de baixa solubilidade, libera esse nutriente paulatinamente no solo (Bolland, 1985).

A distribuição de P extraível no perfil do solo após 14 anos de cultivo em função do sistema de cultivo e do modo de aplicação do fertilizante fosfatado é apresentada na figura 2.

A primeira observação sobre o efeito do modo de aplicação do fertilizante fosfatado e do sistema de

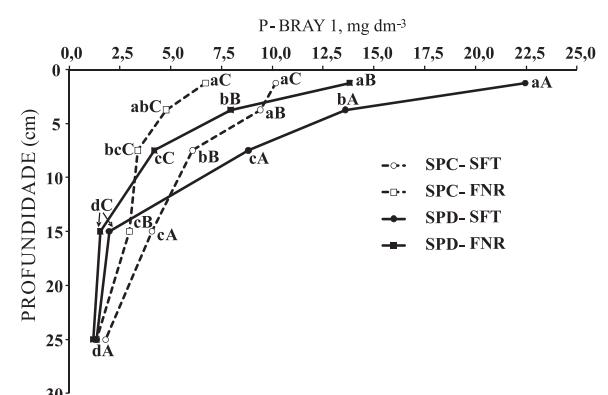


Figura 1. Distribuição do P extraível avaliado por Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argilososo cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P_2O_5 como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independentemente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco). Letras maiúsculas compararam tratamentos na mesma profundidade e letras minúsculas compararam profundidades no mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Student ($p > 0,05$).

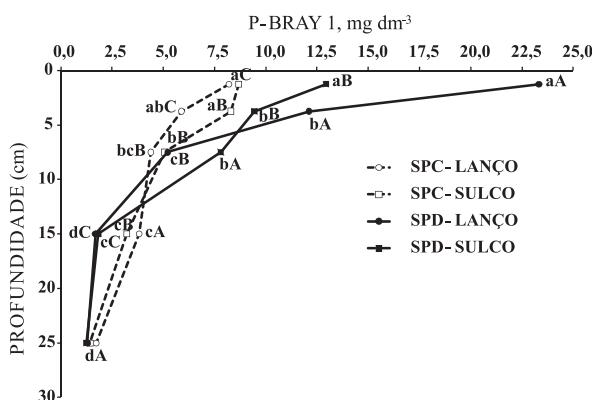


Figura 2. Distribuição do P extraível avaliado por Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ aplicados a lanço e no sulco de semeadura, independentemente da fonte do fertilizante (média entre tratamentos que receberam superfosfato triplo e fosfato natural reativo). Letras maiúsculas comparam tratamentos na mesma profundidade e letras minúsculas compararam profundidades no mesmo tratamento. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Student (p > 0,05).

cultivo na distribuição de P no solo é de que no SPC não há gradiente expressivo de decréscimo de P em profundidade, para os dois modos de aplicação, fato que ocorreu no SPD, especialmente para aplicações a lanço, mas não de forma tão acentuada para aplicações no sulco. Resultado semelhante foi obtido por Rheinheimer & Anghinoni (2001), avaliando três camadas (0 a 2,5; 2,5 a 7,5; e 7,5 a 15 cm) de um Latossolo Vermelho distrófico típico cultivado por 15 anos sob SPD e SPC. Esses autores observaram elevado gradiente de P entre as camadas do solo sob SPD, ao passo que nas camadas do solo sob SPC havia distribuição mais uniforme desse nutriente.

Dessa forma, no SPC, observa-se distribuição de P semelhante nos dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, em virtude da homogeneização proporcionada a cada revolvimento anual do arado de discos, havendo uma única diferença na camada de 2,5 a 5 cm do tratamento no sulco, que apresentou maiores teores de P em relação à mesma camada do tratamento a lanço (Figura 2). Isso se deve ao efeito da adubação da safra agrícola de 2007/2008, uma vez que no momento da amostragem a área ainda não havia sido preparada para a safra seguinte, havendo, portanto, presença de P reagido de SFT e FNR, mas não redistribuído pela planta, ou de P não reagido de FNR e em menor proporção de SFT, cuja possibilidade foi observada por Sousa & Volkweiss (1987b).

No SPD, os teores de P da camada 0 a 2,5 cm representam o acúmulo proporcionado pela decomposição de resíduos vegetais depositados ao longo dos 14 anos de cultivo na superfície do solo, cujo efeito foi observado por Santos & Tomm (2003); no tratamento a lanço esse efeito se soma à própria adubação feita nessa camada. Assim, para a camada de 0 a 2,5 cm, os teores de P avaliados por Bray-1 são 80 % maiores no tratamento a lanço do que aqueles obtidos no sulco (Figura 2). Acúmulo superficial de P também foi reportado por Costa et al. (2009) em Argissolo Vermelho distrófico cultivado por 18 anos sob SPD.

Avaliando a distribuição de P nas camadas de solo até 10 cm de profundidade do SPD (Figura 2), a partir da superfície, a camada de 2,5 a 5 cm representa uma região de início de inversão dos efeitos dos modos de aplicação, uma vez que nessa camada, apesar de ainda inferiores estatisticamente, os teores de P dos tratamentos de adubação no sulco aproximam-se daqueles observados nos tratamentos a lanço, tornando-se superiores na camada de 5 a 10 cm.

Na camada de 5 a 10 cm do SPD e para adubação a lanço, os teores de P representam o acúmulo proporcionado ao longo de 14 anos pela decomposição nessa camada de resíduos de raízes de soja, milho e milheto que utilizaram para o seu desenvolvimento o P do fertilizante aplicado na camada de 0 a 2,5 cm. Além disso, a mobilização por ocasião da sulcagem nos plantios de soja, milho e milheto a 50, 80 e 20 cm de espaçamento, respectivamente, pode resultar numa movimentação de solo da camada de 0 a 2,5 cm para camadas mais profundas. No caso da adubação no sulco, os teores de P na camada de 5 a 10 cm do SPD representam principalmente o acúmulo proporcionado pela manutenção do adubo na região em que ele foi aplicado (5 a 8 cm de profundidade) ao longo dos 14 anos de cultivo. Dessa forma, para a camada de 5 a 10 cm, os teores de P avaliados por Bray 1 são 50 % maiores no tratamento no sulco do que aqueles obtidos a lanço (Figura 2).

Os maiores teores de P no SPD na camada de 0 a 2,5 cm em relação à de 5 a 10 cm, nos tratamentos que receberam adubação no sulco, diferem de trabalhos com a mesma temática (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Nunes et al., 2008; Santos, 2009). No entanto, isso se justifica pelo fato de ao longo dos 14 anos de cultivo terem sido depositados no solo, pela palhada de soja e milho, cerca de 97 kg ha⁻¹ de P₂O₅, (considerando a quantidade total de P exportada pelos grãos de 550 kg ha⁻¹ de P₂O₅, representando 85 % do total absorvido, sendo o restante devolvido ao solo pelos restos vegetais) e, pela palhada de milheto, cerca de 133 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (considerando a produção média de matéria seca de milheto de 53.657 kg ha⁻¹ e teor médio de 2,47 kg de P₂O₅ por tonelada de matéria seca), para a média dos tratamentos com SFT e FNR adubados no sulco. Assim, após 14 anos de cultivos, de um total de P residual no solo de 570 kg ha⁻¹ de

P_2O_5 (obtido pela subtração entre o total adicionado pelo fertilizante e o total exportado pelos grãos), para a média dos tratamentos sob SPD adubados com SFT e FNR no sulco de semeadura, 230 kg ha⁻¹ de P_2O_5 , ou seja, 40 %, foram absorvidos pelas plantas de soja, milho e milheto e depositados na superfície do solo, indicando que existe elevada capacidade de redistribuição do P localizado no sulco mesmo para fontes de baixa solubilidade em água, como o FNR, e em condições de não revolvimento do solo, como no SPD.

Da mesma forma, os maiores teores de P na camada de 2,5 a 5 cm do tratamento que recebeu adubação a lanço em relação àquele que recebeu adubação no sulco no SPD indica elevada capacidade de redistribuição do P aplicado na superfície do solo. Por fim, esse efeito também é verificado na comparação dos teores de P avaliado por Bray 1 na camada de 5 a 10 cm do tratamento que recebeu adubação a lanço em relação à área nativa do cerrado (5,2 e 1,4 mg dm⁻³, respectivamente), uma vez que a área não foi corrigida com P antes da implantação do experimento.

As camadas abaixo de 20 cm (20 a 30, 30 a 40 e 40 a 50 cm) no SPC e abaixo de 10 cm (10 a 20, 20 a 30, 30 a 40 e 40 a 50 cm) no SPD apresentaram teores de P semelhantes tanto nas comparações entre tratamentos como em profundidade (Figuras 1 e 2). Além disso, nessas mesmas camadas os teores de P foram semelhantes aos obtidos em área nativa de Cerrado localizada próximo ao experimento. Isso indica que mesmo após 14 anos de cultivo, com 1.120 kg ha⁻¹ de P_2O_5 aplicado e 557 e 645 kg ha⁻¹ de P_2O_5 residual no solo sob SPD e SPC, respectivamente (tendo o restante removido pelas colheitas de soja e milho), o que representa o dobro do que se recomenda como adubação corretiva para a região (Sousa et al., 2004), o P limita-se até 10 cm de profundidade no SPD e até 20 cm de profundidade no SPC, independentemente do modo de aplicação ou da fonte do fertilizante fosfatado.

Os teores de P nas camadas até 10 cm (0 a 2,5 cm, 2,5 a 5 cm e 5 a 10 cm) no SPD apresentam-se muito superiores aos encontrados no SPC, compreendendo valores 1,2 a 2,2 vezes maiores para comparações envolvendo as fontes (Figura 1) e 1,1 a 2,8 vezes para comparações envolvendo os modos de aplicação (Figura 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Hargrove et al. (1982), Follet & Peterson (1988), Edwards et al. (1992), Selles et al. (1997), Bravo et al. (2007), Nunes et al. (2008), Costa et al. (2009) e Santos (2009) em experimentos com 5 a 18 anos de condução. No entanto, Duiker & Beegle (2006) observaram diferenças nos teores de P sob SPD em comparação com SPC apenas nos 5 cm superficiais, mesmo após 25 anos de condução do experimento.

Por outro lado, na camada de 10 a 20 cm, os teores de P no SPC são da ordem de 1,8 a 2,2 vezes maiores que os obtidos no SPD, para comparações envolvendo as fontes (Figura 1) e modos de aplicação (Figura 2).

No entanto, na camada onde o teor de P extraível é maior no SPC, este ainda se encontra na faixa considerada muito baixa, de acordo com interpretações da região (Embrapa, 1982).

No quadro 1 são apresentados os estoques de P extraível no solo até 30 cm de profundidade e sua distribuição relativa após 14 anos de cultivo, em função do sistema de cultivo, do modo de aplicação do fertilizante fosfatado e da fonte do fertilizante. Essa profundidade foi definida considerando que os tratamentos utilizados alteraram a distribuição de P até 20 cm de profundidade e que a camada de 20–30 cm representa aquela onde os tratamentos se igualam quanto ao teor de P (Figuras 1 e 2).

Observa-se elevada estratificação do P no SPD, que apresenta cerca de 76 % do estoque de P da camada de 0 a 30 cm localizado nos primeiros 10 cm de profundidade, independentemente do modo de aplicação e da fonte do fertilizante. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (2009), que, comparando a distribuição até 30 cm de profundidade do P extraível em um Latossolo cultivado por oito anos sob SPD e adubado com SFT e FNR no sulco e a lanço, observaram 70 % do P avaliado por Bray 1, contido nos primeiros 10 cm, tanto para os tratamentos a lanço como no sulco.

No entanto, apesar da alta estratificação de P nas camadas superficiais do solo sob SPD (Figuras 1 e 2 e Quadro 1), os rendimentos de grãos da soja cultivada na safra que antecedeu a amostragem do solo foram maiores neste sistema em relação ao SPC (Quadro 1). Isso evidencia que, apesar de o desenvolvimento radicular e a absorção de P pelas plantas aumentarem com o volume de solo adubado (Ball-Coelho et al., 1998; Costa et al., 2009), estas possuem mecanismos de compensação morfológicos (Anghinoni & Barber, 1980) e fisiológicos (Edwards & Barber, 1976; Jungk & Barber, 1974) que podem compensar excessivas localizações de P, como as observadas nos solos sob SPD neste trabalho, e, assim, absorver a quantidade necessária ao satisfatório desenvolvimento vegetativo e produção de grãos.

Com relação ao SPC, independentemente do modo de aplicação e da fonte do fertilizante, apenas 53 % do estoque de P da camada de 0 a 30 cm localizou-se nos primeiros 10 cm de profundidade; ao avaliar a camada de 0 a 20 cm, esse valor foi de 85 %, indicando no SPC um maior volume de solo fertilizado em comparação com o SPD, que, no entanto, proporcionou menor rendimento de grãos de soja (Quadro 1).

Apesar do maior volume fertilizado, o SPC apresenta menor estoque de P extraível por Bray 1 na camada de 0 a 30 cm de profundidade em relação ao SPD (Quadro 1). Isso se deve, entre outros fatores, ao efeito de diluição do fertilizante durante o revolvimento do solo a 20 cm de profundidade com o arado de discos, de modo que, ao reagir com uma camada maior de solo proporciona menores teores de P capazes de ser extraídos. Além disso, o não

Quadro 1. Estoques de P extraíveis avaliados por Bray 1 e rendimentos de soja no 14º cultivo em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura

Sistema	Fonte	Modo	Estoque de P extraível			Rendimento de grãos de soja no 14º cultivo ⁽³⁾	
			Total ⁽¹⁾	Distribuição relativa ⁽²⁾			
				0–10	0–20		
SPC	SFT	Lanço	30,6	49 e	84	3.369	
		Sulco	32,8	63 d	89	3.498	
	FNR	Lanço	21,3	50 e	84	3.657	
		Sulco	19,7	50 e	84	3.442	
	SPD	SFT	38,3	81 a	92	4.196	
		Sulco	35,4	77 ab	91	4.054	
SPD	FNR	Lanço	24,9	74 bc	88	3.848	
		Sulco	20,4	70 c	87	4.042	
	Média dos sistemas						
	SPC		26,1 b	53 b	85 b	3.492 b	
	SPD		29,8 a	76 a	90 a	4.035 a	

⁽¹⁾ Avaliado na camada de 0 a 30 cm de profundidade. ⁽²⁾ Valores representam as quantidades relativas de P extraível por Bray 1, em cada camada de solo, tendo como referência o estoque total na camada de 0 a 30 cm de profundidade. ⁽³⁾ O rendimento de grãos de soja do tratamento sem P no SPC foi de 82 kg ha⁻¹. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Student ($p > 0,05$).

revolvimento no SPD permite menor passagem do P do fertilizante para formas adsorvidas de elevada estabilidade (Sousa & Volkweis, 1987a), bem como proporciona acúmulo de matéria orgânica no solo (Bayer et al., 2000), o que, de diversas formas (Goedert & Oliveira, 2007), pode atuar aumentando a disponibilidade de P no solo.

Assim, apesar dos diversos benefícios do SPD em relação ao SPC descritos na literatura, como a melhor dinâmica de água (Costa et al., 2003) e estruturação do solo (Bertol et al., 2004), maior atividade biológica (Mendes et al., 2003) e dinâmica de nutrientes (Santos & Tomm, 2003), o maior estoque de P extraível por Bray 1 no SPD (14,2 % a mais que no SPC) parece justificar o maior rendimento de grãos de soja no 14º ano de cultivo (Quadro 1), quando este sistema apresentou 15,5 % (543 kg ha⁻¹) de soja a mais do que o SPC, para a média dos quatro tratamentos (SFT e FNR, a lanço e no sulco). Isso pode ser verificado pelo maior ($p < 0,05$) teor foliar de P no momento do pleno florescimento nos tratamentos sob SPD (média para SFT e FNR, a lanço e no sulco de 3,0 g kg⁻¹), em relação àqueles sob SPC (média para SFT e FNR, a lanço e no sulco de 2,3 g kg⁻¹); como a faixa de teor foliar considerada adequada para a região é de 2,5 a 5,0 g kg⁻¹ (Sousa & Lobato, 2004b), os níveis no SPC encontram-se abaixo do recomendado, justificando as menores produtividades neste sistema em relação ao SPD.

Para visualizar a relação entre o teor de P extraível por Bray 1 e os rendimentos de grãos de soja no 14º ano de cultivo, foram obtidos coeficientes de correlação, utilizando 24 pares (SPD e SPC, adubados com SFT e

FNR, a lanço e no sulco, todos com três repetições) e considerando diferentes profundidades na obtenção da média ponderada do teor de P. A correlação não foi significativa ($r = 0,41$) quando a profundidade considerada foi até 20 cm para os dois sistemas, mas foi significativa a 0,1 % pelo teste F ($r = 0,68$) quando os teores de P foram obtidos até 20 cm para o SPC e até 10 cm para o SPD. Isso ocorre por serem estas as camadas alteradas pela adubação fosfatada (Figuras 1 e 2), de modo que nelas se encontram mais de 75 % do estoque de P extraível por Bray na camada de 0 a 30 cm (Quadro 1). Schlindwein & Gianello (2008) observaram maiores coeficientes de determinação entre o rendimento relativo das culturas de soja, milho e trigo e o teor de P no solo sob SPD na camada de 0 a 10 cm em comparação com a de 0 a 20 cm de profundidade. Assim, considerando as camadas alteradas pela adubação fosfatada de cada tratamento, observa-se que o aumento no teor de P no SPD resultou em aumento no rendimento de grãos, em relação ao SPC.

Levando-se em conta a quantidade de P adicionada ao longo dos 14 anos de cultivo (1.120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e aquela exportada pelos grãos nesse mesmo período, calculou-se o P residual no solo (Quadro 2). Observou-se menor quantidade de P₂O₅ residual no solo adubado com SFT sob SPD em relação aos demais tratamentos, que não diferiram entre si. Essas diferenças são justificadas pelas maiores produtividades obtidas nos tratamentos com SFT sob SPD, resultando em maior exportação de P e menor quantidade de P residual no solo. Em relação ao FNR sob SPD, os tratamentos com SFT sob SPD (média dos

Quadro 2. Teor médio de P extraível avaliado por Bray 1, quantidade de P_2O_5 residual no solo e relação entre a quantidade de P_2O_5 residual no solo e o teor de P extraível em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha^{-1} ano $^{-1}$ de P_2O_5 como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independentemente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco)

Sistema	Fonte	Teor de P ⁽¹⁾	P_2O_5 residual no solo ⁽²⁾	P_2O_5 residual no solo / teor de P
SPC	SFT	mg dm^{-3}	kg $ha^{-1} P_2O_5$	kg $ha^{-1} P_2O_5/mg dm^{-3}$
	FNR	6,0 c 3,8 d	643 a 646 a	108 b 173 a
SPD	SFT	13,4 a	491 b	37 d
	FNR	7,5 b	624 a	84 c

⁽¹⁾ Os teores de P foram obtidos como uma ponderada entre as camadas de 0 a 2,5; 2,5 a 5,0; 5,0 a 10; e 10 a 20 cm para o SPC e de 0 a 2,5; 2,5 a 5,0; e 5,0 a 10 cm para o SPD. ⁽²⁾ Calculado subtraindo-se da quantidade de P adicionada ao longo dos 14 anos de cultivo (1.120 kg ha^{-1} de P_2O_5) aquela exportada pelos grãos nesse mesmo período. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Student ($p > 0,05$).

dois modos de aplicação) produziram 7.235 kg ha^{-1} de grãos a mais, e as maiores diferenças ocorreram nos primeiros anos do experimento, conforme já relatado por Sousa & Lobato (2004a). No que se refere aos tratamentos sob SPC adubados com SFT e FNR (média dos dois modos de aplicação, para cada fonte), os tratamentos sob SPD adubados com SFT produziram, respectivamente, 4.352 e 5.516 kg ha^{-1} de grãos a mais; as maiores diferenças ocorreram nos últimos anos do experimento, inclusive no 14º ano, conforme apresentado no quadro 1.

No entanto, observa-se que os tratamentos sob SPD, mesmo com quantidade de P_2O_5 residual no solo menor, no caso do SFT, ou igual, no caso do FNR, apresentaram maior disponibilidade média de P em relação aos tratamentos sob SPC (Quadro 2), de modo que a relação entre a quantidade de P_2O_5 residual no solo e o teor de P extraível, que indica o requerimento de P necessário para incrementar em 1 mg dm^{-3} o seu teor no solo, é muito menor no SPD em relação ao SPC, para as duas fontes de P.

No caso do FNR, o maior requerimento de P para incrementar em 1 mg dm^{-3} o teor no solo, em relação ao SFT, ambos sob SPD, pode ter ocorrido em função da presença de FNR aplicado no 14º cultivo, porém não dissolvido completamente, bem como de uma possível subestimativa na determinação de P pelo extrator Bray 1, uma vez que, como as produtividades das culturas atualmente são as mesmas, era de se esperar que a disponibilidade de P também fosse. Essa problemática já havia sido levantada por Sousa & Rein (2009), os quais observaram que, para a produção de 2.500 kg ha^{-1} de soja, era necessário 5,07 mg dm^{-3} de P avaliado por Bray 1 no solo adubado com SFT, enquanto aquele adubado com FNR exigia 3,55 mg dm^{-3} , representando uma subestimativa de 30 % nos tratamentos com FNR em relação ao SFT. Utilizando um fator de correção de 1,43 (5,07/3,55), calcularam-se os novos teores de P nos tratamentos com FNR sob

SPC e SPD, que, divididos pela quantidade de P_2O_5 residual no solo, fornecem um requerimento de P de 119 e 58 kg ha^{-1} de P_2O_5 para incrementar em 1 mg dm^{-3} o teor no solo. Esses valores são muito mais próximos daqueles obtidos para os tratamentos sob SFT em cada sistema e mais condizentes com a realidade.

Na comparação entre os sistemas, quando adubados com SFT, o menor requerimento de P para incrementar em 1 mg dm^{-3} o teor no solo sob SPD (66 % a menos em relação ao SPC) evidencia que nesse sistema a nova dinâmica de fertilidade de solo estabelecida (Nicolodi et al., 2008) favorece a disponibilização do P para as plantas, resultando nos maiores rendimentos de grão de soja obtidos no 14º cultivo da área (Quadro 1).

CONCLUSÕES

1. A distribuição de P extraível no solo após 14 anos de cultivo é influenciada pela fonte do fertilizante fosfatado, pelo modo de aplicação e pelo sistema de cultivo.

2. Os maiores teores de P extraível por Bray 1 são encontrados na camada superficial (0 a 2,5 cm), independentemente da fonte do fertilizante, do modo de aplicação e do sistema de cultivo. Entretanto, esse efeito é muito mais pronunciado no plantio direto, para aplicações de superfosfato triplo e a lanço na superfície.

3. Após 14 anos de cultivo, o sistema plantio direto apresenta maior quantidade de P extraível por Bray 1 em relação ao sistema de preparo convencional, apesar de conter menor quantidade de P residual no solo.

4. O rendimento de grãos de soja no 14º ano de cultivo da área não foi alterado pela fonte do fertilizante fosfatado ou pelo modo de aplicação, e sim pelo sistema

de cultivo. O maior rendimento foi obtido no sistema plantio direto, sendo explicado pela maior disponibilidade de P neste sistema em relação ao preparo convencional.

5. O requerimento de P para incrementar em 1 mg dm⁻³ o teor no solo é menor no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional do solo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo apoio financeiro na concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor.

LITERATURA CITADA

- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. Anuário estatístico do setor de fertilizantes para 2008. São Paulo, Comitê de Estatística, 2009. 158p.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. R. Bras. Ci. Solo, 16:349-353, 1992.
- ANGHINONI, I. & BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:1041-1044, 1980.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C. & SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textures soil. Soil Tillage Res., 45:237-249, 1998.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. New York, John Wiley & Sons, 1984. 398p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. R. Bras. Ci. Solo, 24:599-607, 2000.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. R. Bras. Ci. Solo, 28:155-163, 2004.
- BOLLAND, M.D.A. Residual value for wheat of phosphorus from calciphos, Duchesne rock phosphate and triple superphosphate on a lateritic soil in south-western Australia. Austr. J. Exper. Agric., 25:198-208, 1985.
- BOLLAND, M.D.A. & BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. Austr. J. Agric. Res., 33:1061-1071, 1982.
- BRAVO, C.A.; GIRALDEZ, J.V.; ORDOÑEZ, R.; GONZALEZ, P. & TORRES, F.P. Long-term influence of conservation tillage on chemical properties of surface horizon and legume crops yield in a Vertisol of Southern Spain. Soil Sci., 172:141-148, 2007.
- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci., 59:39-45, 1945.
- COELHO, A.M. & ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.243-283.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. R. Bras. Ci. Solo, 27:527-535, 2003.
- COSTA, F.S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A. & MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 32:323-332, 2008.
- COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G. & HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth related to long-term tillage systems and fertilizer placement. R. Bras. Ci. Solo, 33:1237-1247, 2009.
- DEMARRAIS, I.C.; NNABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferrasol in southern Brazil. Soil Tillage Res., 51:71-79, 1999.
- DUIKER, S.W. & BEEGLE, D.B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. Soil Tillage Res., 88:30-41, 2006.
- EDWARDS, J.H. & BARBER, S.A. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. Agron. J., 68:973-975, 1976.
- EDWARDS, J.H.; WOOD, C.W.; THURLOW, D.I. & RUF, M.E. Tillage and crop rotation effects on fertility status of Hapludult soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:1577-1585, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Soja. Soja: Nutrição mineral, adubação e calagem. Londrina, 1986. 51p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Embrapa comunicação para transferência de tecnologia. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, 1999. 370p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Rel. Tec. Anu. Cerrados - 1980-1981. Planaltina, 1982. v.6. 163p
- FOLLET, R.F. & PETERSON, G.A. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:141-147, 1988.

- GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B. & BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 166:750-755, 2003.
- GOEDERT, W.J. & OLIVEIRA, S.A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1. p.991-1017.
- HARGROVE, W.L.; REID, J.T.; TOUCHTON, J.T. & GALLAHER, R.N. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped soybean production. *Agron. J.*, 74:674-684, 1982.
- HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H. & SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:145-154, 1999.
- JUNGK, A. & BARBER, S.A. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. *Agron. J.*, 66:554-557, 1974.
- KAMINSKI, J. Efeito de cinco fosfatos pré-, co- e pós-aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench-CV. Conti-Brasil), em três solos ácidos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 1983. 126p. (Tese de Doutorado)
- KLEPKER, D. & ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo fosfatado. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:403-408, 1995.
- KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A. & HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. *Sci. Agric.*, 56:391-396, 1999.
- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S. & GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:435-443, 2003.
- MODEL, N.S. & ANGHINONI, I. Resposta do milho a diferentes modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:55-59, 1992.
- NICOLODI, M.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; MARRÉ, J. & MIELNICZUK, J. Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2735-2744, 2008. (Número Especial)
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1. p.471-550.
- NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J. & SOARES, J.R.R. Impacto dos sistemas de plantio direto e preparo convencional nas interações entre matéria orgânica e fertilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: anais. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2008. CD ROM.
- PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C. & CHIEN, S.H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba, Potafos, 2004. p.605-663.
- RAIJ, B.van. & DIEST, B.van. Phosphate supplying power of rock phosphate in an Oxisol. *Plant Soil*, 55:97-104, 1980.
- RHEINHEIMER, D.S. & ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:151-160, 2001.
- SANTOS, D.B.M. Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto. Brasília, Universidade de Brasília, 2009. 81p. (Tese de Mestrado)
- SANTOS, H.P. & TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. *Ci. Rural*, 33:477-486, 2003.
- SCHLINDWEIN, J.A. & GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2037-2049, 2008
- SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P. & FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Tillage Res.*, 44:23-34, 1997.
- SMITH, F.W.; ELLIS, B.G. & GRAVA, J. Use of acid-fluoride solution for the extraction of available phosphorus in calcareous soil and soils which rock phosphate has been added. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21:400-404, 1957.
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba, Potafos, 2004a. p.157-200.
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. *Cerrado: Correção do solo e adubação*. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004b. 416p.
- SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. & REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. *Cerrado: Correção do solo e adubação*. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. p.147-168.
- SOUSA, D.M.G. & REIN, T.A. Disponibilidade de fósforo em Latossolo de cerrado sob plantio direto adubado com duas fontes de fósforo avaliada por diferentes extratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÉNCIA DO SOLO, 32., Fortaleza, 2009. Anais... Fortaleza, 2009. CD ROM.
- SOUSA, D.M.G., REIN, T.A. & LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: anais. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2008. CD ROM.

SOUZA, D.M.G. & VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:141-146, 1987a.

SOUZA, D.M.G. & VOLKWEISS, S.J. Reações de superfosfato triplo em grânulos com solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:133-140, 1987b.