

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

APLICAÇÃO DE FOSFATO NATURAL E RECICLAGEM DE FÓSFORO POR MILHETO, BRAQUIÁRIA, MILHO E SOJA⁽¹⁾

José Salvador Simoneti Foloni⁽²⁾, Carlos Sergio Tiritan⁽²⁾, Juliano
Carlos Calonego⁽³⁾ & Jaime Alves Junior⁽⁴⁾

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo avaliar, comparativamente, a capacidade extratora de P da soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*), braquiária brizantha (*Brachiaria brizantha*) e milheto (*Pennisetum glaucum*), submetidos a diferentes doses do fertilizante fosfatado natural fosforita Alvorada, em condições controladas. Utilizou-se um Argissolo Vermelho distroférico de textura média, corrigido e adubado com N, K e micronutrientes. As espécies foram cultivadas em vasos de 18 dm³ por 50 dias em casa de vegetação, com aplicação de 0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅. As quantidades de fosfato natural foram calculadas com base na teor total de P₂O₅. O milho, ao contrário da soja, respondeu positivamente ao aumento da dose de P₂O₅ via fosforita Alvorada. A *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, apesar da menor produção de matéria seca em relação ao milheto, apresentou alta eficiência na absorção de P, mesmo com o fornecido deste nutriente por meio de fonte pouco solúvel. O milheto apresentou-se como importante espécie de cobertura do solo, graças ao alto potencial para produção de fitomassa e reciclagem de P num intervalo de tempo relativamente curto (50 dias).

Termos de indexação: *Pennisetum glaucum*, *Brachiaria brizantha*, gramíneas tropicais, espécies de cobertura.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em outubro de 2006 e aprovado em janeiro de 2008.

⁽²⁾ Professor Doutor em Agronomia - Centro de Ciências Agrárias, UNOESTE. Rodovia Raposo Tavares, km 572. CEP 19067-175 Presidente Prudente (SP). E-mail: sfoloni@unoeste.br; tiritan@unoeste.br

⁽³⁾ Doutorando em Agricultura, Departamento de Produção Vegetal-FCA, UNESP. Caixa Postal 237, CEP 18603-970, Botucatu-SP. E-mail: jcalonego@fca.unesp.br

⁽⁴⁾ Graduando em Agronomia. Centro de Ciências Agrárias, UNOESTE. E-mail: jaimealvesjr@yahoo.com.br

SUMMARY: ROCK PHOSPHATE FERTILIZATION AND PHOSPHORUS RECYCLING BY PEARL MILLET, *Brachiaria sp.*, CORN AND SOYBEAN

*The objective of this experiment was to compare the ability of soybean (*Glycine max*), corn (*Zea mays*), *Brachiaria brizantha* cv. *Marandu* and pearl millet (*Pennisetum glaucum*) for P-uptake, at different levels of the Alvorada natural rock phosphate, under controlled conditions. The soil used was a dystrophic Hapludalf (180 g kg⁻¹ clay), which was limed and fertilized with N, K and micronutrients. The crops were grown in 18 dm³ pots for 50 days in a greenhouse, at different P₂O₅ rates (0, 100, 200, and 400 kg ha⁻¹). The amount of rock phosphate was calculated based on the total P₂O₅ content. Contrasting to soybean, there was a positive response of maize to higher P₂O₅ doses. The dry matter production by *Brachiaria brizantha* cv. *Marandu* was lower than that observed for pearl millet, but it still was highly efficient in P uptake despite the low solubility of the rock phosphate. Pearl millet is an important cover crop because of the high dry matter production and the capacity for recycling P in a relatively short period (50 days).*

Index terms: *Pennisetum glaucum*, *Brachiaria brizantha*, *tropical grasses*, *cover crops*.

INTRODUÇÃO

De acordo com Novais & Smyth (1999), solos altamente intemperizados são predominantes nas regiões tropicais do Brasil, caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes às lavouras, com destaque para a limitação de P. Os solos agrícolas, de modo geral, apresentam teores totais de P variando de 200 a 3.000 mg dm⁻³, porém, menos de 0,1 % dessas reservas encontra-se disponível às plantas (Nahas, 1991). Sendo assim, segundo Raij (1991), na agricultura tropical, geralmente aplicam-se adubos fosfatados em quantidades muito superiores às necessidades das plantas, em decorrência da alta fixação química deste nutriente por componentes do solo.

Discute-se muito a viabilidade de programas de rotação de culturas nas regiões de inverno seco do Brasil Central, onde predominam períodos prolongados de estiagem nos meses de abril a setembro, comprometendo a reciclagem de nutrientes e a cobertura do solo no Sistema Plantio Direto (SPD). Nesse contexto, as plantas de cobertura têm destaque como alternativa para elevar a sustentabilidade dos sistemas produtivos, em que é possível ter sucessões entre lavouras comerciais, como o milho e a soja, e espécies tropicais, como o milheto e as braquiárias, que viabilizam a produção de palhada e possibilitam o pastejo nos meses mais secos na entressafra de verão, na chamada Integração Lavoura-Pecuária (IAP).

De acordo com Pereira Filho et al. (2005), o cultivo do milheto africano (*Pennisetum glaucum*) vem crescendo intensamente no Brasil, a ponto de ser, na atualidade, a cultura mais importante em termos de área na entressafra de verão na região centro-oeste, principalmente para produção de palhada no SPD. Segundo relato dos autores, resultados experimentais e práticos caracterizam o milheto como verdadeira

“bomba” recicladora de nutrientes, ou seja, esta gramínea apresenta elevada capacidade para extrair nutrientes do solo, quando comparada a outras culturas agrícolas, em virtude de sua alta adaptabilidade aos solos tropicais, principalmente sob condições acentuadas de deficiência hídrica. Além da cobertura do solo, Netto (1998) argumenta que o milheto tem alta aptidão para produção de forragem no sistema ILP. Por sua vez, segundo Macedo (2004), as gramíneas tradicionalmente utilizadas na pecuária do Brasil Central, como as do gênero *Brachiaria* (trazidas do continente africano), vêm sendo introduzidas em larga escala nos últimos 30 anos nas regiões tropicais, e a simples introdução dessas forrageiras proporcionou aumentos consideráveis na lotação animal das pastagens por sua elevada adaptabilidade aos solos ácidos e de baixos teores de P.

De acordo com Kluthcouski & Aidar (2003), o Sistema Santa Fé, contemplado dentro de programas de ILP, fundamenta-se na produção consorciada de culturas de grãos, especialmente o milho, sorgo, arroz e soja, com forrageiras tropicais, principalmente as do gênero *Brachiaria*, sendo os principais objetivos desse sistema a produção de fitomassa para alimentação animal na entressafra de verão e palhada para o SPD, com diversos benefícios agrônômicos ao sistema de produção, dentre eles o incremento na reciclagem de nutrientes.

No que se refere à eficiência de absorção de P pelas plantas cultivadas, segundo Siqueira et al. (2004), as culturas devem apresentar sistema radicular de alta adaptabilidade aos solos tropicais, que é fundamental na racionalização da adubação fosfatada, pois quase sempre as concentrações deste nutriente na solução do solo são da ordem de μmol L⁻¹. De Maria & Castro (1993), após cultivar aveia-preta e crotalária júncea como coberturas de entressafra de verão no SPD por

sete anos, observou maiores teores de P disponíveis no perfil do solo rotacionado com aveia, possivelmente graças à maior eficiência em produzir fitomassa e ao sistema radicular mais capacitado desta gramínea em relação à crotalária, promovendo maior reciclagem de P no SPD.

A eficiência agrônômica da adubação fosfatada, segundo Chien & Menon (1995), é fortemente afetada pela natureza físico-química do fertilizante, por propriedades do solo (acidez, textura, mineralogia, matéria orgânica, etc.), práticas de manejo e espécies vegetais cultivadas. Para Novais & Smyth (1999), a solubilização de adubos fosfatados depende principalmente das propriedades do solo (acidez e adsorção) e da planta cultivada.

Os adubos fosfatados acidulados apresentam solubilidades relativamente elevadas em água (como os superfosfatos simples e triplo), razão por que têm alta eficiência agrônômica quando comparados aos fosfatos naturais; no entanto, os elevados custos de fabricação dos fosfatos solúveis têm incentivado o uso de fontes alternativas de P (Prochnow et al., 2004). Por outro lado, no que diz respeito aos fertilizantes fosfatados naturais, Horowitz & Meurer (2004) relatam que tais adubos apresentam graus distintos de reatividade no solo de acordo com o tipo de material de origem, ou seja, os fosfatos naturais de origem vulcânica (apatitas), por exemplo, em virtude de seu alto grau de cristalização e natureza físico-química dos minerais, são menos solúveis, quando comparados aos de origem sedimentar (bauxitas fosfóricas), influenciando fortemente a eficiência agrônômica da adubação.

A escolha da fonte de P normalmente baseia-se tanto na eficiência em suprir o nutriente para as plantas como na relação custo:benefício da adubação (Goedert et al., 1986). Os fosfatos naturais são fertilizantes que apresentam geralmente baixa disponibilidade de P para as plantas no curto prazo, porém, com custos por unidade de P relativamente mais baixos do que os fosfatos solúveis (Novais & Smyth, 1999).

Portanto, a utilização de gramíneas tropicais de cobertura, comumente caracterizadas pela adaptabilidade relativamente alta a condições edafoclimáticas adversas, para integrarem programas de rotação de culturas no SPD e na IAP em regiões de inverno seco, é estratégia importante para tentar incrementar a eficiência de uso de fosfatos naturais e a reciclagem de P e, por consequência, proporcionar maior sustentabilidade aos sistemas de produção no Brasil Central.

Este trabalho teve por objetivo avaliar, comparativamente, a disponibilidade do P no solo e a capacidade extratora deste nutriente pela soja, milho, braquiária brizantha e milheto, submetidos a diferentes doses do fosfato natural fosforita Alvorada, em condições controladas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade do Oeste Paulista, UNOESTE, em Presidente Prudente-SP, durante os meses de setembro a novembro de 2005. Utilizaram-se amostras de solo agrícola coletada em um Argissolo Vermelho distroférico (Embrapa, 1999), na profundidade de 0–20 cm. A terra foi seca ao ar e passada em peneira com malha de 2 mm. Amostras foram coletadas para caracterização da fertilidade do solo antes da montagem do experimento, de acordo com Raij et al. (2001), com os seguintes valores: pH (CaCl₂ 1 mol L⁻¹) 5,3; 13 g dm⁻³ de M.O.; 8 mg dm⁻³ de P_{resina}; 20 mmol_c dm⁻³ de H+Al; 1,3 mmol_c dm⁻³ de K; 21 mmol_c dm⁻³ de Ca; 9 mmol_c dm⁻³ de Mg; 31 mmol_c dm⁻³ de SB; 51 mmol_c dm⁻³ de CTC e 61 % de saturação por bases (V). A granulometria do solo, de acordo com Embrapa (1997), foi definida como de textura média (760 g kg⁻¹ de areia, 180 g kg⁻¹ de argila e 60 g kg⁻¹ de silte), e o ponto máximo de retenção de água do solo desestruturado (capacidade de campo), determinado no aparelho extrator de Richards a -0,03 MPa (Embrapa, 1997), foi de 165 g kg⁻¹.

Aplicou-se calcário dolomítico (CaO: 28 %, MgO: 20 % e PRNT: 95 %) para elevar a saturação por bases a 70 % (Raij et al., 1997); posteriormente, o solo foi umedecido à capacidade de campo e acondicionado em sacos plásticos por 20 dias para a reação do corretivo. Em seguida, o solo foi seco ao ar novamente e adubado com 120 mg dm⁻³ de K e 25 mg dm⁻³ de N, via cloreto de potássio e nitrato de amônio, respectivamente. Foram ainda aplicados 2,0 mg dm⁻³ de Mn, 6,0 mg dm⁻³ de Zn, 1,5 mg dm⁻³ de Cu, 2 mg dm⁻³ de B e 1 mg dm⁻³ de Mo, como MnSO₄, ZnSO₄, CuSO₄, H₃BO₃ e (NH₄)₂MoO₄, respectivamente, via água de irrigação. Aos 15 e 30 dias da emergência das plântulas (15 e 30 DAE), aplicaram-se 50 mg dm⁻³ de N por vaso, na forma de uréia.

Os vasos utilizados continham 18 dm³, e o solo foi acomodado de tal forma para que sua densidade permanecesse próxima a 1,2 kg dm⁻³. O adubo fosfatado natural fosforita Alvorada foi misturado em todo o volume de solo dos vasos no dia da semeadura das espécies estudadas. A fosforita Alvorada foi previamente analisada, de acordo com Brasil (1983), apresentando os seguintes resultados: 240 g kg⁻¹ de P₂O₅ total, 8 g kg⁻¹ de P₂O₅ em água, 32 g kg⁻¹ de P₂O₅ em citrato neutro de amônio mais água, 77 g kg⁻¹ de P₂O₅ em ácido cítrico 2 dag L⁻¹ (1:100), densidade de 1,83 kg dm⁻³, 100 % dos grânulos passados na peneira de 0,84 mm (ABNT N. 20) e 92 % dos grânulos passados na peneira de 0,30 mm (ABNT N. 50). Nos cálculos das fosfatagens, considerou-se o volume da camada arável em um hectare (equivalente a 2.000.000 dm³, com 20 cm de profundidade efetiva), e foram aplicadas quantidades equivalentes às doses de 0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, correspondentes às dos tratamentos.

O experimento foi instalado utilizando-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com quatro repetições, no esquema fatorial 4 x 4, com os seguintes tratamentos: braquiária (*Brachiaria brizantha*, cultivar Marandu), milho (*Zea mays*, cultivar DKB-350), milheto (*Pennisetum glaucum*, cultivar BN-2) e soja (*Glycine max*, cultivar IAC-18), submetidos às doses equivalentes a 0, 100, 200 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na fonte fosforita Alvorada.

Aos 10 DAE, fez-se um desbaste deixando cinco plantas de braquiária, cinco de milheto, duas de milho e duas de soja por vaso. Esta diferença no número de plantas por vaso teve por objetivo simular uma situação real de campo, em que as culturas de espécies forrageiras e, ou, de cobertura de braquiária brizantha e milheto são instaladas com populações relativamente maiores que as de lavouras comerciais de milho e soja.

A umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo por meio de regas diárias controladas para repor a água evapotranspirada, fazendo-se o monitoramento por meio de pesagens diárias de quatro vasos, um para cada espécie, escolhidos aleatoriamente. Aos 50 DAE, fez-se a coleta da parte aérea das plantas, com o corte realizado rente à superfície do solo. O material vegetal foi seco em estufa de aeração forçada a 60 °C, por 48 h, e teve a massa da matéria seca determinada, assim como o teor de P contido na fitomassa (Malavolta et al., 1997). Amostras de solo também foram coletadas aos 50 DAE, retirando-se alíquotas de todo o volume homogeneizado dos vasos, para determinação dos teores de P pelo método da resina trocadora (Raij et al., 2001).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de regressão linear e curvilínea e foram aceitas equações significativas até 5 % de probabilidade pelo teste F, que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R²).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O P disponível no solo foi elevado de maneira expressiva com a aplicação do fosfato natural, apresentando ajustes lineares de acordo com o aumento das doses de fosforita Alvorada em praticamente todas as condições de cultivo (Figura 1). De acordo com tabelas de interpretação propostas por Raij et al. (1997) para solos do Estado de São Paulo, a fosfatagem natural realizada no presente experimento elevou os teores de P do solo da classificação de baixo para médio (preconizada para culturas anuais), com doses a partir de 200 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na fonte Fosforita Alvorada. No entanto, ocorreram respostas distintas de incremento de P no solo de acordo com a espécie cultivada, ou seja, a máxima dose de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ disponibilizou cerca de 19 mg dm⁻³ de P no solo cultivado com milheto, contra teores variando de 24 a 27 mg dm⁻³ de P nos tratamentos com braquiária, milho e soja.

Os menores teores de P observados no solo submetido ao milheto demonstram, de certa forma, o alto potencial desta gramínea tropical em extrair P do solo (Figura 4), reforçando os relatos de Pereira Filho et al. (2005), em que o milheto africano é considerado uma verdadeira “bomba” recicladora de nutrientes, melhorando a fertilidade de solos de Cerrado, quando utilizado em rotação sucedendo lavouras comerciais de verão. Segundo Chien & Menon (1995) e Novais & Smyth (1999), a eficiência agrônômica da adubação fosfatada é altamente dependente da espécie extratora, e Siqueira et al. (2004) também relatam que a adaptabilidade aos solos tropicais da espécie a ser cultivada é fundamental para definir o grau de eficiência na absorção de P, fator determinante na racionalização da adubação fosfatada.

Observa-se, na figura 2, que somente a soja não respondeu à aplicação de fosfato natural, considerando a produção de fitomassa. No trabalho de Bedin et al. (2003), em que se estudou o desempenho da soja submetida a diversos adubos fosfatados, verificou-se que o fosfato natural de Araxá chegou a incrementar significativamente a produção de fitomassa desta leguminosa em relação ao tratamento-testemunha (ausência de aplicação de P), porém, com resultados expressivamente muito inferiores aos observados para a soja submetida a outros fertilizantes fosfatados mais reativos, como o superfosfato triplo e o termofosfato magnésiano. No trabalho de Braga et al. (1991), constatou-se que doses relativamente elevadas de fosfato natural, da ordem de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, não foram suficientes para atingir os níveis considerados adequados de P nas folhas de soja. Portanto, os resultados do presente experimento, no que se refere

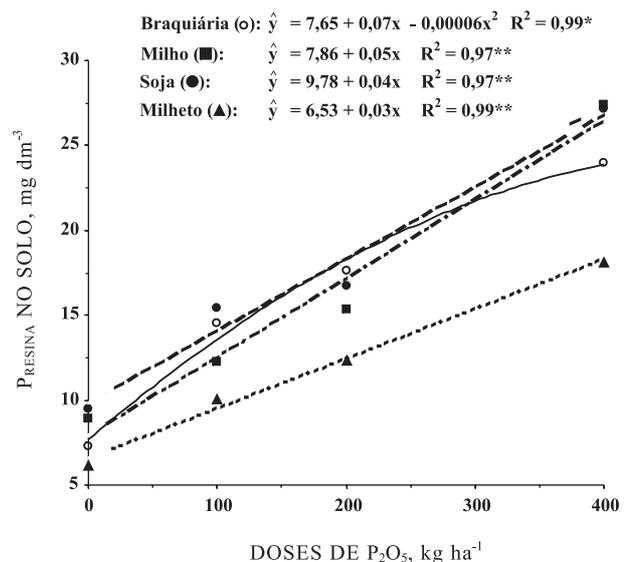


Figura 1. Teor de P_{resina} no solo após o cultivo de milheto, braquiária, soja e milho aos 50 dias, em função da adubação com fosforita Alvorada. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

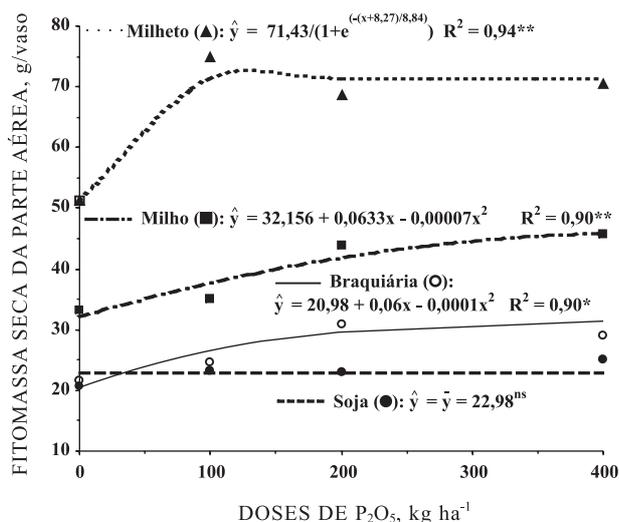


Figura 2. Fitomassa seca do milho, braquiária, soja e milho aos 50 dias da emergência das plantas, em função da adubação com fosforita Alvorada. ns: não-significativo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

à ausência de resposta da soja a fosfato natural, são condizentes com dados da literatura, caracterizando que a fonte fosforita Alvorada apresenta potencial pouco satisfatório para programas de adubação desta leguminosa produtora de grãos.

Uma das características determinantes na escolha de espécies de cobertura para compor programas de rotação no SPD é o rápido crescimento inicial das plantas nos primeiros 30 a 60 dias depois da semeadura, pois a cultura de cobertura tem de competir com a vegetação espontânea e estabelecer-se de maneira satisfatória no terreno. Partindo desse princípio, o milho destacou-se fortemente no acúmulo de fitomassa aos 50 DAE (Figura 2), superando expressivamente a produção de matéria seca da soja, milho e braquiária, mesmo na ausência de adubação fosfatada. Além disso, observa-se, na figura 2, que a produção de palhada de milho não respondeu às doses superiores a 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, via Fosforita Alvorada.

Segundo Sousa & Lobato (2004), de maneira geral, para culturas anuais produtoras de grãos cultivadas em solos de Cerrado, como o milho e a soja, os maiores incrementos de produtividade são observados com doses de até 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅, utilizando fontes solúveis. Por outro lado, os autores também relatam que para espécies menos exigentes, como algumas gramíneas forrageiras tropicais, os maiores incrementos de produção de fitomassa são observados quando se aplicam até 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o que evidencia o comportamento diferenciado entre as espécies.

Santos & Kliemann (2005), avaliando o desempenho do milho submetido a doses de superfosfato triplo, constataram que a produção de

fitomassa desta gramínea foi incrementada linearmente até 500 a 800 kg ha⁻¹ de P₂O₅, variando de acordo com os teores de argila dos solos estudados (Latosolo Vermelho distrófico, Argissolo Vermelho eutrófico, Argissolo Vermelho eutrófico e Neossolo Quartzarênico). Os autores também verificaram que houve baixa eficiência do fosfato natural em relação ao superfosfato triplo na adubação do milho, com comprometimento na produção de fitomassa de até 70 %.

Apesar do alto potencial do milho em produzir palhada no curto prazo, as concentrações de P na parte aérea desta gramínea de cobertura foram relativamente bem inferiores às das outras culturas estudadas, principalmente quando foi submetida às menores doses de fosforita Alvorada (Figuras 2 e 3). Em contrapartida, a braquiária apresentou, de maneira muito expressiva, os maiores teores de P na fitomassa, em todas as doses de fosfato natural (Figura 3). De acordo com revisão elaborada por Araújo & Machado (2006), discutiu-se que espécies adaptadas a solos de baixa fertilidade geralmente apresentam taxas de crescimento relativamente mais baixas e altas concentrações de nutrientes nos tecidos, em comparação a espécies de rápido crescimento sob as mesmas condições, confirmando, em termos teóricos, o que foi observado no presente estudo com a braquiária (Figuras 2 e 3). No entanto, os autores supracitados ponderam que o crescimento vegetativo lento não constitui necessariamente uma adaptação ao baixo suprimento de P do solo, uma vez que espécies herbáceas precisam ter rápido crescimento inicial para poderem competir e se estabelecer no ambiente.

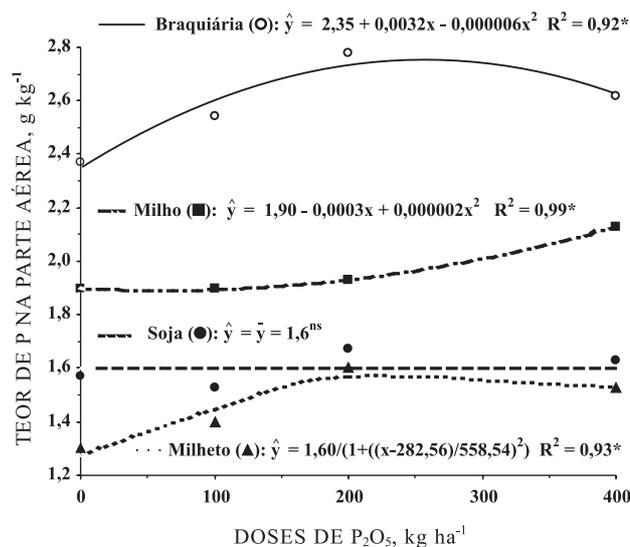


Figura 3. Teor de P na fitomassa do milho, braquiária, soja e milho aos 50 dias da emergência das plantas, em função da adubação com fosforita Alvorada. ns: não-significativo. * significativo a 5 %.

Segundo Macedo (2004), espécies do gênero *Brachiaria* trazidas do continente africano transformaram-se em verdadeiras monoculturas no Cerrado brasileiro, ocupando, na atualidade, cerca de 32 milhões de hectares dos 50 milhões estimados para as áreas de pastagens no Brasil Central, graças, dentre outros fatores, à elevada adaptabilidade aos solos ácidos e com baixos teores de P. No presente experimento, a braquiária brizantha apresentou alto desempenho em absorver P mesmo na ausência de adubação fosfatada (Figura 3), além disso, foi a única espécie estudada que apresentou teores de P na fitomassa dentro dos limites considerados de suficiência nutricional, de acordo com Malavolta et al. (1997) e Boaretto et al. (1999).

Segundo Anghinoni (2004), a eficiência no aproveitamento de determinado nutriente pelas culturas pode ser definida de duas formas: do ponto de vista fisiológico, quantificando-se a produção de fitomassa por unidade de nutriente absorvido; e do ponto de vista agrônomo, em que a eficiência é expressa pelo rendimento agrícola (produtividade de grãos, frutos, tubérculos, etc.) por unidade de nutriente aplicado na lavoura. Partindo dos fundamentos relatados por esse autor, a braquiária apresentou teores de P na palhada relativamente muito superiores aos do milho, em todos os níveis de adubação fosfatada estudados, porém o milho produziu muito mais fitomassa do que a braquiária, por unidade de P absorvido. Portanto, considerando o fato de que os fertilizantes são utilizados para proporcionar maior capacidade de crescimento às plantas cultivadas, o milho superou fortemente a braquiária; por outro lado, a braquiária demonstrou elevada capacidade de absorção de P por unidade de matéria vegetal produzida, o que pode ser um ponto positivo no que diz respeito à ocupação de solos com baixos suprimentos deste nutriente (Figuras 2 e 3).

Segundo Goedert et al. (1986) e Sousa et al. (2002), espécies do gênero *Brachiaria* apresentam índices de aproveitamento relativamente elevados de adubos fosfatados pouco solúveis. Sendo assim, o P oriundo de fosfatos naturais, que, na maioria dos casos, estaria pouco disponível para a grande parte das culturas produtoras de grãos, é convertido em formas orgânicas, após ser absorvido por gramíneas tropicais de cobertura, e passaria a ser mais disponível para as lavouras em sucessão, após ocorrer a mineralização do P ligado a cadeias carbônicas dos restos vegetais (Sousa et al., 2002). Segundo Sousa et al. (1997), em áreas envolvendo rotações de culturas produtoras de grãos com pastagens de braquiária, 56 %, em média, do P aplicado foi recuperado pelas plantas constituintes do sistema, enquanto nas áreas cultivadas somente com as lavouras graníferas a recuperação foi de apenas 35 %, em média, do P adicionado via fertilizantes, em 17 anos de cultivos consecutivos, com doses variando de 0 a 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ aplicadas anualmente nas culturas.

Ainda com relação à braquiária, doses entre 200 e 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na fonte fosforita Alvorada foram as que proporcionaram os maiores teores de P e produção de fitomassa no presente trabalho (Figuras 2 e 3). No experimento de Schunke et al. (1992), foram obtidos aumentos da ordem de 100 % na produção de palhada da braquiária brizantha com 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, porém utilizando-se um fertilizante fosfatado de alta solubilidade em água.

Portanto, a baixa produção de fitomassa da braquiária aos 50 DAE, em comparação ao milho ou até mesmo ao milho (Figura 2), deixa claro que o potencial de crescimento inicial desta forrageira constitui ponto negativo em termos de rotação de culturas no SPD. Em contrapartida, o fato de as braquiárias apresentarem, de maneira geral, alta adaptabilidade a solos tropicais (Sousa et al., 2002; Macedo, 2004), o que pode ser explicado, em parte, pela alta eficiência em absorver P por unidade de fitomassa produzida (Araújo & Machado, 2006), como foi constatado no presente estudo com a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Figura 3), faz desta gramínea tropical uma alternativa considerável para compor programas de rotação de culturas, visando a obter maiores taxas de aproveitamento de fosfatos naturais e de reciclagem de P.

As espécies cultivadas no presente trabalho comportaram-se de maneira distinta no que diz respeito às variações dos teores de P na parte aérea vegetal de acordo com o aumento das doses de fosforita Alvorada, sendo a soja a única cultura indiferente ao fertilizante fosfatado, com teor médio de 1,6 g kg⁻¹ de P (Figura 3). Além disso, o máximo teor de P observado na matéria seca do milho ocorreu somente com a dose máxima de fosfatagem natural de 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, enquanto, na braquiária e no milho, os máximos teores de P nas palhadas foram constatados com adubações da ordem de 242 e 220 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Ou seja, as duas culturas produtoras de grãos (soja e milho) apresentaram comportamentos bem distintos em relação às espécies de cobertura e, ou, forrageiras tropicais (milho e braquiária).

Para o milho, a máxima dose de P₂O₅ aplicada não foi suficiente para que ocorresse a máxima produção de matéria seca, de acordo com o ajuste matemático efetuado no presente trabalho, que pela equação seria em torno de 450 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 2). Ou seja, há uma tendência estimada de resposta positiva linear do milho com o aumento das doses de fosfato natural, superando os 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, ao contrário do que ocorreu com a soja que não sofreu alteração na produção de fitomassa, quando submetida às doses de fosforita Alvorada.

De posse dos resultados de teores de P e produção de fitomassa (Figuras 2 e 3), calculou-se o acúmulo de P na parte aérea vegetal das espécies estudadas (Figura 4), auxiliando na identificação das culturas com maior potencial para reciclar P em sistemas de produção, pois, segundo Jones & Woodmansee (1979),

cerca de 77 % em média do P contido nas folhas e 79 % do P das raízes ficam disponíveis para o crescimento das lavouras instaladas logo após o manejo dos restos vegetais de plantas de cobertura.

Dentre as culturas produtoras de grãos testadas no presente experimento, deve-se ressaltar o comportamento linear positivo do milho no que diz respeito ao acúmulo de P na fitomassa de acordo com o aumento das doses da fosforita Alvorada, ao contrário da soja que novamente não respondeu ao P aplicado (Figura 4). A inexistência de resposta da soja ao fosfato natural pode ser explicada, em tese, por se tratar de uma leguminosa, que a diferencia de todas as outras espécies avaliadas no presente trabalho (gramíneas), provavelmente por apresentar sistema radicular relativamente menos ramificado e menos volumoso, resultando em menor contato raiz-solo, dificultando a absorção do P por difusão e interceptação radicular.

Segundo Machado & Furlani (2004), diferenças inter e intra-específicas na capacidade de utilizar o P do solo são explicadas, em parte, por variações na morfologia e fisiologia das raízes, as quais caracterizam as plantas quanto à aquisição de P. De acordo com Siqueira et al. (2004), o potencial genético de espécies ou cultivares em absorver P do solo é atribuído principalmente aos seguintes fatores: morfologia, quantidade e distribuição de pêlos radiculares; colonização de micorrizas; associações com microrganismos solubilizadores de P na rizosfera; secreção de ácidos orgânicos, prótons e substâncias quelantes; secreção de enzimas fosfatases; elevada eficiência fotossintética e adaptabilidade a condições edafoclimáticas adversas.

Outra hipótese para caracterizar a ausência de resposta da soja ao fosfato natural pode ser baseada em relatos apresentados na revisão de Araújo & Machado (2006), segundo os quais cultivares modernos podem apresentar baixa eficiência na absorção de nutrientes por terem sido selecionados em condições experimentais de alta fertilidade do solo. Tal situação poderia ter acarretado seleções indiretas de genótipos altamente responsivos aos fertilizantes, visto que, nos processos de melhoramento vegetal, geralmente procura-se obter altas produtividades em condições de elevada oferta de nutrientes.

O milho apresentou os maiores acúmulos de P na palhada em todas as condições de fosfatagem estudadas, quando comparado ao milho, à soja e à braquiária (Figura 4), em decorrência da maior produção de fitomassa aos 50 DAE (Figura 2), o que, de certa forma, explica o fato de ter havido as menores concentrações de P no solo submetido ao cultivo desta gramínea de cobertura (Figura 1). Além disso, observa-se, na figura 4 que o milho atingiu o máximo acúmulo de P na palhada com cerca de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, enquanto os máximos acúmulos deste nutriente nas fitomassas da braquiária e do milho ocorreram com doses da ordem de 200 e 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅, respectivamente. Ou seja, o milho apresentou as seguintes vantagens: com 50 dias produziu muito mais palhada; proporcionou os menores teores de P disponível no solo (teoricamente reduzindo a susceptibilidade de fixação deste nutriente por componentes químicos do solo); apresentou o maior índice de eficiência em termos de produção de fitomassa por unidade de P aplicado e mostrou-se altamente capacitado em reciclar e aproveitar o P oriundo de fosfato natural de baixa reatividade.

Segundo Sousa & Lobato (2004), uma prática comprovada que resulta em aumento na recuperação do P adicionado via adubação é a rotação de culturas que contemple espécies com alta eficiência em extrair P do solo. Portanto, uma possível alternativa para elevar os índices de aproveitamento dos fertilizantes pelas lavouras seria por meio de fosfatagens junto às semeaduras de plantas de cobertura nas entressafras das culturas produtoras de grãos, como é o caso do milho africano, reduzindo a exposição do P à fixação no solo, além de minimizar outras formas de perda como a erosão. Nesse contexto, a fosfatagem tradicionalmente recomendada com incorporação do adubo por meio de aração e, ou, gradagem antes da instalação de lavouras graníferas poderia ser substituída por aplicações de P junto às semeaduras de espécies de cobertura no SPD.

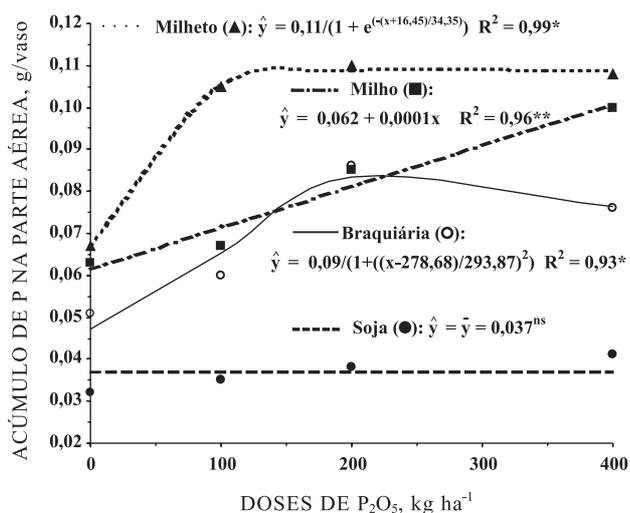


Figura 4. Acúmulo de P na fitomassa do milheto, braquiária, soja e milho aos 50 dias da emergência das plantas, em função da adubação com fosforita Alvorada. ns: não-significativo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

CONCLUSÕES

1. Por seu alto potencial para produção de fitomassa e reciclagem de P no curto prazo (50 dias),

o milheto apresenta-se como importante espécie de cobertura do solo para compor rotações de culturas.

2. *A Brachiaria brizantha* cv. Marandu, apesar da menor produção de matéria seca em relação ao milheto, mostrou-se altamente eficiente na absorção de P, mesmo sendo este nutriente fornecido de fonte pouco solúvel.

3. O milho, ao contrário da soja, respondeu positivamente ao aumento da dose de P_2O_5 via fosforita Alvorada.

LITERATURA CITADA

- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.537-558.
- ARAÚJO, A.P. & MACHADO, C.T.T. Fósforo. In: FERNANDES, M.S., ed. Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.253-280.
- BEDIN, N.R.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; FAQUIM, V.; TOKURA, A.M. & SANTOS, J.Z.L. Fertilizantes fosfatados e produção de soja em solos com diferentes capacidades tampão de fosfatos. R. Bras. Ci. Solo, 27:639-646, 2003.
- BOARETTO, E.A.; CHITOLIA, J.C.; RAIJ, B.van; SILVA, F.C.; TEDESCO, M.J. & DO CARMO, C.A.F.S. Amostragem, acondicionamento e preparação das amostras de plantas para análise química. In: SILVA, F.C., ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. p.49-73.
- BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; RAIJ, B.van; FEITOSA, C.T. & HIROCE, R. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. R. Bras. Ci. Solo, 15:315-320, 1991.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura: Legislação. Brasília, 1983. 88p.
- CHIEN, S.H. & MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. Fert. Res., 41:227-234, 1995.
- DE MARIA, I.C. & CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. R. Bras. Ci. Solo, 17:471-477, 1993.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J., ed. Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo. São Paulo, Nobel, 1986. p.129-166.
- HOROWITZ, N. & MEURER, E.J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.665-682.
- JONES, M.B. & WOODMANSEE, R.G. Biogeochemical cycling in annual grassland ecosystems. Bot. Rev., 45:111-144, 1979.
- KLUTHCOUSKI, J. & AIDAR, H. Uso da integração lavoura pecuária na recuperação de pastagens degradadas. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F. & AIDAR, H., eds. Integração lavoura pecuária. Santo Antonio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p.183-225.
- MACEDO, M.C.M. Adubação fosfatada em pastagens cultivadas com ênfase na região do Cerrado. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.359-396.
- MACHADO, C.T.T. & FURLANI, A.M.C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. Sci. Agric., 61:69-76, 2004.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, Potafos, 1997. 319p.
- NAHAS, E. Ciclo do fósforo: transformações microbianas. Jaboticabal, Funep, 1991. 67p.
- NETTO, D.A.M. A cultura do milheto. Sete Lagoas, Embrapa/CNPMS, 1998. 6p. (Comunicado Técnico, 11)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- PEREIRA FILHO, I.A.; RODRIGUES, J.A.S.; KARAM, D.; COELHO, A.M.; ALVARENGA, R.C.; CRUZ, J.C. & LARA CABEZAS, W. Manejo da cultura do milheto. In: NETTO, D.A.M. & DURÕES, F.O.M., eds. Milheto: tecnologias de produção e agronegócio. Brasília, Embrapa/Informações Tecnológicas, 2005. p.59-87.
- PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C. & CHIEN, S.H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.605-651.
- RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001.
- RAIJ, B.van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. 285p.
- RAIJ, B.van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Ceres, Potafos, 1991. 343p.

- SANTOS, E.A. & KLIEMANN, H.J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos de Cerrado e sua avaliação por extratores químicos. *Pesq. Agropec. Trop.*, 35:139-146, 2005.
- SCHUNKE, R.M.; CADISCH, G.; SANTOS, J.C.C. & BODDEY, R.M. Mineralização da matéria orgânica do solo em pastagem de *Brachiaria decumbens* adubada com fósforo. In: RED INTERNATIONAL DE EVALUACIÓN DE PASTOS TROPICALES RIEPT. REUNIÓN SABANAS, 1., Brasília, 1992. Red Internacional... Cali, Embrapa/CPAC/CIAT, 1992. p.455-458.
- SIQUEIRA, J.O.; ANDRADE, A.T. & FAQUIM, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.117-149.
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.157-196.
- 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. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2002. p.147-168.
- SOUSA, D.M.G.; VILELA, L.; REIN, T.A. & LOBATO, E. Eficiência da adubação fosfatada em dois sistema de cultivo em um Latossolo de Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Informação, globalização, uso do solo. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.