



**Universidade
Estadual de Londrina**

Cristine Elizabeth Alvarenga Carneiro

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO PELA
INTERAÇÃO DO CALPOT E SILÍCIO**

Londrina
2003

Cristine Elizabeth Alvarenga Carneiro

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO PELA
INTERAÇÃO DO CALPOT E SILÍCIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Roberto A. Fioretto

Londrina
2003

Cristine Elizabeth Alvarenga Carneiro

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO PELA
INTERAÇÃO DO CALPOT E SILÍCIO**

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a Carmen Silvia Neves

Prof Luiz Antônio Corrêa
Lucchesi, PhD.

(Orientador) Prof. Dr. Roberto A.
Fioretto

Londrina, 24 de junho de 2003.

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais, Jonas e Ivany

À minha irmã, Nádia

Ao meu esposo, Geraldo

À minha filha, Ana Tereza

Pela dedicação e amor.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao meu orientador Dr. Roberto A. Fioretto.

Aos Coordenadores do Curso de Pós-Graduação.

Aos Professores do Departamento de Agronomia da UEL

À Renata C. Mello Alves Silva, técnica do laboratório de solos da UEL.

Às instituições EMBRAPA e IAPAR pelo apoio.

A Laborsolo (Central de Análises Agronômicas – Londrina) pelo apoio na realização das análises químicas.

Ao Departamento de Química da UEL, em especial aos professores Dr. Henrique de Santana e Dr. Dimas A. Morozin Zaia.

Ao químico Décio Zoocoler do IAPAR.

CARNEIRO, Cristine Elizabeth Alvarenga. Disponibilidade de fósforo no solo pela interação do calpot e silício. 2003. 54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2003.

RESUMO

A disponibilidade dos nutrientes no solo é fundamental para o crescimento e desenvolvimento da planta. Entretanto, a presença de óxidos de Fe e Al na fração argila dos solos tropicais leva à adsorção do fósforo solúvel, tornando-o limitante para a absorção vegetal. Vários estudos demonstram a diminuição dessa adsorção, quando o P é co-aplicado na etapa da calagem, associado com ânion de mesma carga, como os silicatos. A fim de se estabelecer um produto de reação química sinérgica como: correção da acidez, neutralização do Al-tóxico, fornecimento de cátions básicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+}) e fósforo solúvel, procedeu-se um ensaio utilizando O Latossolo Vermelho Distroférico, em condições de laboratório e em casa de vegetação. Em laboratório, estudou-se a formulação com elementos P.A., utilizando tubos de ependorf para incubação do solo saturado com 50% de Ca, 10% de Mg 3% de K, co-aplicados com doses crescentes de P e Si. No experimento em casa de vegetação, aplicou-se sete tratamentos combinados entre calcário, KCl, fosfato decantado – RLT-2 e Si – escória. Cada tratamento continha cinco vasos, tendo a soja como indicador biológico para resposta ao produto. Através da superfície de resposta, evidenciou-se a diminuição na adsorção do fósforo pelo solo com aplicação conjunta dos elementos testados. A planta da soja respondeu positivamente ao maior teor de P-solução, obtido quando o P foi co-aplicado com CALPOT + silício.

Palavras-Chave: Solos. Teor de Fósforo. CALPOT. Silício.

ABSTRACT

The availability of the nutrients in the soil is fundamental for the growth and development of the plant. However, the presence of oxides of Fe and Al in the fraction clay of the tropical soils drives to the adsorption of the soluble P, becoming limitant for the vegetable absorption. Several studies demonstrate the decrease of that adsorption, when P is co-applied in the stage of soil liming, associated with anion, with the same charge, as silicon. In order of establishing a product of synergistic chemical reaction: acidity correction, neutralization of the Al-changeble toxic, supply of basic cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+}) and soluble P, an assay was carried out using Latossolo Vermelho Distroférico. In laboratory and green house conditions. In laboratory, it was studied the formulation with elements P.A., using ependorf tubes for incubation of saturated soil with 50% of Ca, 10% of Mg 3% of K, co-applied with increasing doses of P and Si. In the assay greenhouse, it was applied seven treatments combined with limestone, KCl, decanted phosphate - RLT-2 and Si - scum. Each five vessel constituted a treatment, using soybean as biological indicator. Through the surface answer, the decrease was evidenced in the adsorption of the P by the soil with the co-application of the tested elements. The soybean plant answered positively to the largest amount of P-solution, obtained when P was co-applied with CALPOT + silicon.

Keywords: Soils. Phosphorus Content. CALPOT. Silicon.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 CÁTIOS TROCÁVEIS.....	10
2.2 CORRETIVOS	11
2.3 O FÓSFORO NO SOLO.....	13
2.4 SILÍCIO NO SOLO.....	18
2.5 COMPORTAMENTO DO SILÍCIO E DO FÓSFORO NO SOLO	19
3 ARTIGO CIENTÍFICO: Disponibilidade de Fósforo no Solo pela Interação do Calpot e Silício	22
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A baixa fertilidade dos solos agricultáveis altamente intemperizados é caracterizada pela elevada acidez e pelo baixo teor de nutrientes como Ca, Mg, K e P. Tais solos caracterizam-se por apresentarem minerais de baixa atividade, necessitando da correção de sua fertilidade através da calagem e fosfatagem, visando o aumento de produtividade.

Os óxidos de ferro são o segundo grupo de minerais de argila presentes em solos tropicais, altamente intemperizados. Devido à natureza química, os óxidos são muito eficientes na adsorção de ânions inorgânicos (fosfatos, molibdatos e silicatos) e ânions orgânicos (ácidos orgânicos). Estes minerais estão presentes em muitos solos brasileiros, cujo teor varia de 0,7 até 44% (Kämpf & Curi, 2000). Os minerais de alumínio presentes também nos solos altamente intemperizados são grandes adsorvedores de fósforo como os óxidos de ferro. A força de adsorção dos óxidos de Al e Fe irá depender do ânion a ser adsorvido, o qual possuirá maior ou menor força de ligação.

O fósforo, elemento limitante para o crescimento e desenvolvimento vegetal, por sua importância nos processos metabólicos, é altamente adsorvido pelos solos brasileiros, tornando-se indisponível para a planta. Desta forma, este elemento necessita de aplicações em altas doses para suprir a necessidade da planta. Doses de P para atingir a capacidade máxima de adsorção pode chegar a 4000 mg kg^{-1} solo (Vanderdeelen et al., 1973), tornando a prática de fertilização com adubos fosfatados inviável, devido ao elevado custo.

Assim, para se ter uma aplicação racional e econômica é necessário compreender as interações do fósforo com o solo, como as reações de “sorção”, para poder chegar a manejos que possibilitem maior e melhor aproveitamento do fósforo pelo vegetal.

A utilização de corretivos de acidez auxilia na diminuição do problema da adsorção de P, pois com a elevação do pH, ocorre um aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio, aumento da concentração de OH^- na solução do solo, reduzindo a adsorção do fosfato na fase sólida do solo.

Além dos corretivos de acidez comuns, vem sendo estudada a utilização de escórias. A escória silicato de cálcio eleva o pH do solo, causando o

mesmo efeito que outros corretivos. A grande vantagem no estudo da utilização da escória é a presença do elemento silício, que forma um ânion de mesma carga que o fosfato, podendo substituir os sítios de adsorção nos óxidos de Fe e Al, disponibilizando fósforo na solução do solo.

Visto que existe a necessidade de se realizar os manejos de calagem e adubação fosfatada, é necessário otimizar a forma de aplicação dos insumos, para diminuir custos e melhorar o aproveitamento dos elementos pela planta.

Assim, o presente trabalho teve como finalidade testar uma mistura de elementos químicos, (Ca, Mg, K, P, Si) para propiciar a melhoria das propriedades químicas do solo, (correção dos cátions básicos, pH, Al^{+3}) e a disponibilidade de fósforo, de acordo com a necessidade da área de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A formação dos solos se dá como resultado da interação entre o material de origem, clima e organismos vivos, sob influência do tempo. Com o tempo os solos ficam naturalmente ácidos, pois durante milhões de anos sofreram intempéries climáticas, onde Ca, Mg e K foram lixiviados das camadas superficiais e substituídos por Al, Mn e H. A acidez de cada solo varia de acordo com a composição do mesmo e pelas reações de troca de íons e de hidrólise que ocorre nos componentes inorgânicos e orgânicos existentes. Os solos ácidos estão presentes na grande maioria das regiões agrícolas do Paraná. Apresentam, predominantemente, minerais de argila do tipo caulinita e óxidos de ferro e alumínio, superfícies com cargas variáveis e baixa saturação de cátions básicos (PAVAN et al., 1995). A carga variável na superfície dos colóides é a principal propriedade química dos solos ácidos do Paraná (PAVAN & OLIVEIRA, 2000).

O cultivo agrícola dos solos ácidos exige a aplicação de corretivos e adubos, os quais elevam o pH, neutralizando o efeito dos elementos tóxicos e fornecem cálcio, magnésio, potássio e fósforo (VELOSO et al., 1992).

2.1 CÁTIONS TROCÁVEIS

A calagem, prática mais utilizada no controle da acidez do solo, aumenta o pH e promove a neutralização de Al e H, resultando em aumentos na CTC e na energia de ligação pelos cátions Ca e Mg (KAMINSKI, 2000). A aplicação de potássio, seja na forma de KCl ou resíduos orgânicos (Abreu et al., 2001), libera o elemento para a solução do solo, disponibilizando-o para a planta, a qual absorve em grande quantidade, exportando até 18,5 kg t⁻¹ de grãos de soja (TANAKA & MASCARENHAS, 1992). A disponibilidade de K no solo e a sua absorção pelas plantas parece estar relacionada com a disponibilidade dos cátions bivalentes, Ca e Mg, dominantes do complexo de troca. Ainda assim, a absorção do K pelas plantas é favorecida em comparação com outras espécies catiônicas, sendo, dentre os cátions

macronutrientes, o que se apresenta, em geral, em menor e maior concentração no solo e na planta, respectivamente (OLIVEIRA et al., 2001).

A calagem favorece a manutenção do teor de K trocável do solo, pois aumenta a CTC efetiva e reduz as perdas por lixiviação. Entretanto, a relação dos teores disponíveis de (Ca + Mg)/K deve permanecer em equilíbrio, para que não ocorra limitação de nutrientes na absorção pela planta. Para a soja, esta relação tem se mostrado dependente, alcançando maiores produtividades quando seus índices encontravam-se entre 22 e 31 (MASCARENHAS et al., 1988; MASCARENHAS et al., 2000). Pinto & Lopes (1991) concluíram que a calagem propiciou um considerável efeito residual até dois anos após a aplicação, em termos de aumentos nos teores de Ca, Mg, elevação do pH e redução Al trocável na camada de 0-20 cm de profundidade, havendo também aumento de K solúvel nas camadas de 40-60 cm.

O comportamento e a eficiência dos corretivos dependem de suas características, como a natureza química, o poder de neutralização, a solubilidade, a granulometria e outros (VELOSO et al., 1992).

2.2 CORRETIVOS

Segundo Alcarde (1983), os materiais que podem ser usados na correção da acidez são aqueles que contêm como princípio ativo, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e ou magnésio, tais como; calcário dolomítico, calcário calcítico, óxido de cálcio ou magnésio, hidróxido de cálcio ou de magnésio e escórias.

Os calcários, calcíticos e dolomíticos, são os corretivos da acidez mais utilizados na agricultura, onde os dolomíticos fornecem além do Ca o Mg. Ao ser misturado com o solo, o carbonato de cálcio dissolve-se e reage com água, conforme descrito na equação abaixo.



Pesquisas realizadas com escória mostram que sua ação neutralizante na acidez do solo assemelha-se à do calcário. Em alguns experimentos, tem sido constatado que a escória apresenta reação mais lenta no solo quando comparada ao calcário (PRADO & FERNANDES, 2000; FORTES, 1993; VELOSO et al., 1992).

A escória é muito utilizada na agricultura em outros países como o Japão. Já no Brasil, praticamente não existe utilização, mas a quantidade de escória de siderurgia produzida anualmente no Brasil é cerca de 3 milhões de toneladas (PRADO et al. 2002).

A escória é obtida através do processo siderúrgico, no qual o calcário, o minério de ferro e o carvão são aquecidos a 1.900°C, promovendo a redução do ferro e a produção de material inerte do minério e do carvão, que não foram reduzidos. Estes combinam com Ca e Mg do calcário, dando origem à escória, que apresenta constituinte neutralizante (SiO_3^{2-}) e bases como Ca e Mg (Alcarde, 1992), sendo também fonte de silício, o que pode influenciar na eficiência de aproveitamento dos fertilizantes fosfatados (PRADO & FERNANDES, 1999).

Veloso et al. (1992) comparando o efeito de diferentes materiais no pH do solo conclui que, com exceção do gesso, todos os materiais testados apresentam efeito corretivo de acidez e que o calcário calcinado provocou o maior aumento de pH, seguido do calcário dolomítico e da escória. O cálcio é o maior cátion associável ao carregador de silicato, contribuindo para o aumento de pH, aumento da CTC e decréscimo das concentrações de Al, Fe e Mn na solução, tanto mais quanto se aumenta o suprimento de cálcio.

Oliveira & Pavan (1996) avaliaram, em sistema de plantio direto, a extensão do movimento vertical do calcário dolomítico aplicado em superfície, observando redução na acidez e aumento de Ca-trocável até 40 cm de profundidade.

Mascarenhas et al. (2000) estudaram o calcário e o potássio para a cultura da soja, notando uma resposta imediata à não aplicação de potássio em plantas com 45 dias, as quais apresentaram clorose em um terço de margens das folhas inferiores. Observaram deficiência também para os tratamentos que continham apenas calcário e atribuíram a causa ao desequilíbrio entre $(\text{Ca} + \text{Mg})/\text{K}$, ou outra relação que envolva os três cátions. Dias & Fioretto (2002) combinaram uma fonte de potássio com calcário, o qual favoreceu a aplicação conjunta de um

único produto, o CALPOT, que alterou simultaneamente as relações de equilíbrio dos íons Ca, Mg e K no complexo sortivo do solo.

Prado et al. (2002) observaram que a produção de matéria seca da parte aérea da alface aumentou significativamente com as doses dos corretivos: calcário magnesiano ($R^2 = 0,98$); calcário dolomítico ($R^2 = 0,94$) e escória ($R^2 = 0,89$). Segundo os autores, a resposta positiva da alface à aplicação dos corretivos, especialmente dos calcários, está relacionada à neutralização da acidez do solo e ao fornecimento de nutrientes como Ca e Mg, uma vez, que são conhecidos os efeitos positivos, especialmente do Ca, no crescimento radicular, favorecendo a absorção e o acúmulo de nutrientes (Ca, Mg, Zn e Cu). Os autores também analisaram os corretivos isoladamente; o calcário magnesiano e a escória foram semelhantes entre si e superiores ao calcário dolomítico quanto ao teor de Ca na planta, enquanto a escória proporcionou os teores mais elevados de Mn, Zn e Cu na parte aérea, o que se deve à própria constituição química da escória.

Rosolem & Marcello (1998), estudando o crescimento radicular da soja, constataram que a produção de matéria seca de raízes não foi significativamente afetada pela calagem e adubação fosfatada. Na ausência de fósforo e calagem, as raízes eram mais longas, com maior superfície, e geralmente mais finas. Shenk & Barber (1977) concluíram que a formação de raízes mais finas e mais longas seria um mecanismo utilizado pelas plantas para aumentar a superfície radicular. Sistemas radiculares mais finos (Nilsen & Barber, 1978) têm geometria mais favorável à absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como o P. Entretanto, Rosolem & Marcello (1998), observando os resultados de análise de planta, observaram que o maior comprimento e superfície das raízes observados nas menores doses de P e na menor saturação por bases, embora representassem geometria mais favorável para absorção dos nutrientes pouco móveis no solo, não foram suficientes para compensar a baixa disponibilidade de P.

2.3 O FÓSFORO NO SOLO

Apesar de limitante para a produção agrícola, as plantas exigem pequenos teores de P. No solo, o fósforo pode ser reunido em dois grandes grupos,

orgânico e inorgânico. Os compostos orgânicos que ocorrem no solo, encontram-se diretamente ligados à matéria orgânica, os fosfatos inorgânicos encontram-se em constante interação com os constituintes sólidos do solo (FASSBENDER, 1978), dentro destas duas subdivisões temos: P precipitado com Al, Fe ou Ca, adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, P em solução, P fazendo parte de compostos marcadamente insolúveis (P mineralogicamente estável) e P na forma orgânica (CARVALHO, 1999).

Estas formas de fósforo existem na dependência do pH dos solos, dos produtos de solubilidade dos fosfatos, dos cátions presentes nos solos e do grau de intemperização (VASCONCELLOS et al., 1975). Em quaisquer deles, em função do pH, o P ocorre nas formas aniônicas H_2PO_4^- (fosfato diácido), HPO_4^{2-} (fosfato monoácido) ou PO_4^{3-} (fosfato) (RAIJ, 1991).

A forte interação que apresenta com os constituintes do solo, óxido de Fe e Al, faz com que este nutriente seja adsorvido na superfície destes minerais. A adsorção é um fenômeno pelo qual uma substância se une a uma superfície, ao ser atraída por forças que podem ser: eletrostáticas, de Van der Waals ou químicas, por um período que irá depender do tipo da força atuante (FASSBENDER & BORNEMISZA, 1987). A magnitude do fenômeno depende da natureza e da quantidade de sítios disponíveis na superfície dos minerais, e é afetada pelo teor de argila (BAHIA FILHO et al., 1983).

Segundo Casa Grande & Camargo (1997), a adsorção de fosfato tem sido objeto de estudo em todo o mundo, observando-se o efeito da concentração do íon adsorvido e do pH da solução suporte para a adsorção. Em solos deficientes em fósforo e com grande quantidade de argilominerais e óxidos, a adsorção de P é maior, necessitando de maiores teores de adubação fosfatada. Os aumentos relativos de P-Al e P-Fe com o cultivo indicam a importância das adubações fosfatadas sobre estas frações (MOTTA et al., 2002). Leite (1997), cita que existe uma preocupação com o manejo sustentado do solo, quando adubado maciçamente com P tendo como consequência o impacto econômico da aplicação de altas doses. Inúmeros estudos têm sido realizados, (Muniz et al., 1985; Fassbender, 1987; Iyamuremye & Dyck, 1996) no intuito de otimizar o aproveitamento do P pelas plantas, procurando aumentar a eficiência do P aplicado no solo como fertilizante. De acordo com Carvalho (1999), a diminuição das concentrações de P disponível pelos extratores parece ter sido causada pela

contínua adsorção do elemento com o tempo. Foi constatado por Fassbender (1987), considerável adsorção de P com o tempo em solos tropicais com grandes quantidades de superfícies oxídicas na fração argila. Motta et al. (2002) concluíram também que a adsorção, o teor total e as formas de P ligadas mais fortemente a Al e Fe aumentaram com o caráter oxídico dos solos e as formas pouco lábeis de P predominaram nos latossolos estudados, destacando-se nos cultivados as formas inorgânicas ligadas a Fe e Al.

Segundo Hsu (1965), hidróxidos amorfos de alumínio e óxidos de ferro e não Al^{+3} ou Fe^{+3} são os fatores reais que governam a concentração de fosfato em solução, a atividade do Al^{+3} ou Fe^{+3} é limitada pelo pH, sendo negligenciável em pH 5 ou acima, enquanto não existem limitações para a atividade dos hidróxidos amorfos de alumínio e óxidos de ferro, que podem ter qualquer magnitude em qualquer pH. Souza et al. (1991) identificaram e caracterizaram a mineralogia da fração argila e relacionaram com a adsorção-dessorção de fósforo, obtendo que os óxidos de ferro foram os principais componentes que influenciaram nas reações de adsorção-dessorção de P. Os solos que continham maiores teores de goethita apresentaram maiores valores de adsorção e menores de dessorção.

Segundo Parfitt (1979), os óxidos de Fe e Al são tidos como os constituintes da fração argila mais efetivos na adsorção de P. A reação de adsorção de P à superfície dos minerais de argila é um processo de troca de ligantes do complexo de superfície, em que OH^- e ou moléculas de água previamente coordenadas aos cátions Fe^{+3} ou Al^{+3} são deslocadas pelos íons H_2PO_4^- , formando um novo complexo de superfície (HINGSTON et al., 1972).

Olsen & Watanabe (1957) apresentaram a interação de ânions com a superfície dos colóides, através das equações de adsorção de Langmuir e Freundlich, caracterizando-se um procedimento de ajuste de curva. Já os mecanismos químicos envolvidos na adsorção, de acordo com Casagrande & Camargo (1997), podem ser explicados através de modelos. Os modelos tetraplanar, triplanar, diplanar, de capacitância constante e pK, tentam dar uma descrição molecular do fenômeno de adsorção em condições de equilíbrio.

Com o modelo tetraplanar, a adsorção de fosfato pode ser interpretada por meio do efeito do pH sobre o potencial eletrostático da superfície de adsorção dos colóides do solo e a proporção de íons fosfatos presentes em solução (CASA GRANDE & CAMARGO, 1997). Já a isoterma de Langmuir tem sido

amplamente utilizada para avaliar a magnitude de adsorção de fósforo em relação às propriedades dos solos em diversos países. A isoterma é obtida através da linearização da equação de Langmuir.

Olsen & Watanabe (1957) propuseram o uso da isoterma de Langmuir, para calcular a capacidade máxima de adsorção. Ela é baseada no princípio de que gases são adsorvidos numa superfície sólida como monocamadas, possuindo uma constante de energia específica de adsorção. Segue a equação:

$$C/x/m = 1/kb + C/b$$

$C/x/m$ = quantidade do ânion adsorvido por unidade de peso do solo;

C = concentração do ânion na solução de equilíbrio;

b = capacidade máxima de adsorção do ânion;

K = constante de energia de retenção do ânion;

$1/b$ = inclinação da reta

Os valores da capacidade máxima de adsorção de P, fornecidos pelo parâmetro b da equação de Langmuir, (Motta et al., 2002) variaram de 324 a 3000 mg kg^{-1} , sendo que os solos cultivados apresentaram valores mais baixos do que os não cultivados. Este trabalho indica que à medida que os sítios de adsorção vão sendo ocupados, a capacidade dos solos em adsorver fósforo diminui, isto se não houver a liberação novamente dos sítios de adsorção. Alvarado & Cajuste (1993) mencionam que a aplicação de P produz uma redução de sua adsorção nos solos, pois o fósforo retido nos sítios de adsorção bloqueia futuras reações.

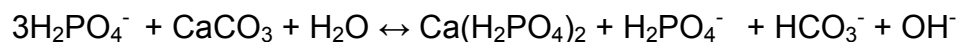
Para uma melhor compreensão do que ocorre com o P no solo foram criados os conceitos: fator intensidade, quantidade, capacidade e difusão. As plantas necessitam continuamente de P na solução do solo, o “fator intensidade” (I), que depende da reposição do P disponível, representado pelo “fator quantidade” (Q), ou a reserva de P no solo. O “fator capacidade, definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P(Q) e o P em solução (I), é conhecido como “poder tampão” de fosfato, que é uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P na solução (NOVAIS & SMYTH, 1999). Muniz et al. (1985) correlacionaram o nível crítico de fósforo na parte aérea da soja com o fator capacidade de fósforo no solo, ou seja, “poder tampão”, e verificaram maior eficiência de utilização do fósforo absorvido pela planta em solos com maior

capacidade tampão. Isto ocorre porque quando o fósforo está mais disponível no solo a planta absorve além da necessidade para a produção máxima de matéria seca, e este fica na forma de reserva, não sendo convertido em massa vegetal (BAHIA FILHO & BRAGA, 1975). Segundo Muniz et al. (1985) além dos fatores que afetam a concentração crítica na planta (tecido e idade dos tecidos escolhidos para análise) a concentração crítica de fósforo na planta é também influenciada pela capacidade tampão do fósforo no solo. Com o aumento da capacidade-tampão, ocorre uma diminuição da concentração crítica.

O problema da aplicação de fertilizantes fosfatados em solos ácidos é que estes passam rapidamente às formas P-Fe e P-Al, as quais não são aproveitadas pelas plantas (FASSBENDER, 1978). Outro fato que limita sua aplicação é o alto custo do fertilizante, muitas vezes a dose utilizada não é suficiente para fornecer o necessário à cultura, devido à elevada intemperização dos solos brasileiros, com elevadas quantidades de óxidos de ferro e alumínio, inviabilizando a absorção pelas plantas.

O pH tem grande influência na adsorção máxima de fosfato. Essa adsorção diminui com a elevação do pH. Ao se elevar o pH da solução de 4,0 para 7,0, o fosfato foi dessorvido em de 14 a 20% (LEAL & VELLOSO, 1973).

Kaminski (1983) estudando o efeito de cinco fosfatos, pré-, co- e pós-aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo em solos argilosos, obteve maiores rendimentos de matéria seca e fósforo absorvido, quando os fosfatos foram co-aplicados ao calcário, sugerindo ser esta a melhor época de adubação fosfatada. Compreende-se melhor esta sugestão, observando a reação apresentada:



A elevação do pH pela calagem promove aumento da concentração e da atividade de íons OH^- em solução, deslocando os equilíbrios para a direita; conseqüentemente parte do fosfato que foi aplicado junto com o calcário ficará em maior quantidade em solução devido ao efeito do pH e outra parte ficará como fosfato de cálcio que é solúvel e disponível às plantas. Como ele estará na forma de fosfato de cálcio, não poderá ser adsorvido pelo solo, pois não apresenta carga. Desta forma, quando solubilizado irá disponibilizar mais fósforo às plantas.

Alvarado & Cajuste (1993), estudando a aplicação de calcário e a retenção de fósforo em solos derivados de cinzas vulcânicas, concluem que os

valores da constante k (constante relacionada com a energia de retenção de P) permitem supor que a aplicação de calcário e fósforo facilita uma maior disponibilidade de P ao diminuir a força com que o P é retido no solo. A aplicação de calcário e P produziu um efeito combinado em todos os solos, exceto no solo 5 (andossolo ócrico). Este efeito no solo 5 pode ter ocorrido devido à formação de fosfatos de cálcio ao aplicar-se calcário e P.

2.4 SILÍCIO NO SOLO

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, representando cerca de 32% em peso de todo material dos solos (TISDALE et al., 1985)

Os minerais silicatados primários, silicatos secundários de Al, e diversas formas de silício são as principais fontes de Si. A principal propriedade estudada na sílica está relacionada à sua superfície, a qual possui um considerável interesse quanto aos estudos da sua propriedade de adsorção de moléculas ou íons (NASSAR et al., 2002).

A concentração de Si na fração argila depende do grau de lixiviação de SiO_2 e de bases do perfil, após intemperismo dos minerais silicatados de origem. Os solos brasileiros caracterizam-se por apresentar este processo de formação, onde se encontram material rico em argilominerais de baixa atividade como a caulinita e óxidos de Fe e Al (KORNDÖFER et al., 1999).

Na solução do solo, o Si comporta-se como um ácido muito fraco (H_4SiO_4), na faixa de pH de 4 a 9, em concentrações variáveis de menos de 1 até 100 mg dm^{-3} em SiO_2 (OLIVEIRA, 1984; RAIJ, 1991). Em pH 7,0 apenas 0,2% do silício ioniza-se na forma carregada negativamente H_3SiO_4^- , diminuindo o grau de ionização com o aumento do pH (MCKEAGUE & CLINE, 1963).

O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a principal espécie química de silicato em solução. Em altas concentrações, ultrapassando $120 \text{ mg SiO}_2 \text{ dm}^{-3}$, passa do estado de coordenação quatro (tetraédrica) e assume coordenação seis (octaédrica). O composto hexacoordenado $[\text{H}_2\text{OSi}(\text{OH})_5]^-$ polimeriza-se e a partir do

polímero formado, unindo-se a unidades de H_4SiO_4 , ocorre a precipitação. (MCKEAGUE & CLINE, 1963).

A adsorção de Si nos solos foi comprovada por Holt & King (1955). O mecanismo que controla o H_4SiO_4 na fase líquida do solo parece ser governado por reações de adsorção dependentes de pH. Quando o H_4SiO_4 sofre desprotonação, forma-se o íon H_3SiO_4^- , que se adsorve aos óxidos de Fe e Al da fração argila.

Para Hingston et al. (1972), a adsorção de H_3SiO_4^- pela goethita é uma adsorção específica por troca de ligantes. A adsorção se dá pela troca entre o anion a ser adsorvido H_3SiO_4^- e moléculas de H_2O ou OH^- , ligadas ao Fe^{+3} na superfície da goethita. A desprotonação do H_4SiO_4 , segundo os mesmos autores, deve-se ao fato de que a energia de adsorção foi suficiente a ponto de dissociar o ácido, que diminui com a redução de pH.

De acordo com Oliveira (1984), foram obtidos maiores valores de capacidade máxima de adsorção para os ânions silicatados e fosfatos quando se teve aumento do conteúdo de argilas desses solos, existindo uma certa tendência da fração argila fixar mais fósforo do que o silício, quando presentes na solução do solo.

2.5 COMPORTAMENTO DO SILÍCIO E DO FÓSFORO NO SOLO

A capacidade das superfícies hidroxiladas dos óxidos de Fe e Al DE adsorver P e Si são bastante relatadas (SILVA, 2001; CARVALHO, 1999; VOLKWEISS & RAIJ, 1977; HIGSTON et al., 1972; OBIHARA & RUSSEL, 1972). Em solos ácidos, uma prática que favorece o aproveitamento do P é o emprego de silicatos, como o CaSiO_3 , proveniente de escórias de siderurgia ou do MgSiO_3 , presente em fontes comerciais como termofosfato magnésiano, pelo aumento de pH. Silva (2001) observou que a escória elevou o pH de três solos em função dos níveis de correção. Prado (2000) cita que quanto maior a quantidade de escória usada, maior o aumento de pH. O aumento de cargas negativas do solo, provocando maior repulsão do ânion fosfato pelas superfícies, pode também, em parte, ser responsável pela menor retenção de fósforo a valores de pH mais elevado (OLIVEIRA, 1984). Silva (2001) notou também que, para os três solos estudados, ocorreu um aumento

na disponibilidade de fósforo em função dos níveis de saturação por bases, após a incubação com a escória e incubação com fósforo. Dados de produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) de plantas cultivadas em latossolo vermelho-escuro e cambissolo aumentaram em função das doses de Si aplicadas nos solos (CARVALHO, 1999).

Obihara & Russel (1972) comprovaram o modelo de adsorção específica proposta por Hingston (1972), estudando o comportamento do H_3SiO_4^- e do H_2PO_4^- em quatro solos altamente fixadores de fosfato, concluindo que o grau de adsorção das duas espécies foi diretamente proporcional à adsorção máxima, à energia de ligação e a atividade de cada ânion em solução (FIGURAS 2 E 3).

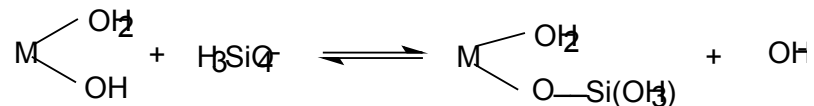


Figura 1: Esquema da adsorção do Si no solo

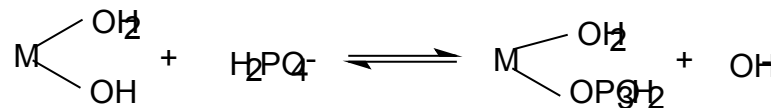


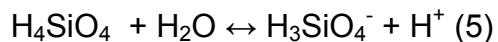
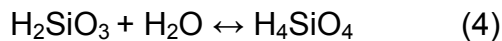
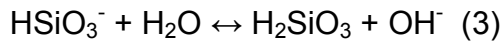
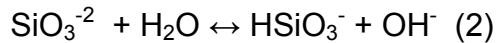
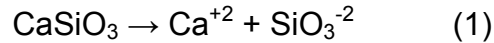
Figura 2: Esquema da adsorção do P no solo

Carvalho (1999) estudou a interação silício-fósforo em latossolo vermelho-escuro e cambissolo cultivados com mudas de eucalipto, notou que não se obteve aumento no conteúdo de P das plantas cultivadas no LE, solo que apresentou teores elevados de gibsit. O autor explica que devido à baixa absorção de P pela planta houve um ganho sutil na produção de MSPA das plantas cultivadas no Cambissolo em relação ao LE

O ânion silicato podendo ser adsorvido irá competir pelos mesmos sítios de adsorção que o P, impedindo ou dificultando a adsorção de P, que desta maneira ficaria mais disponível em solução (OBIHARA & RUSSEL, 1972). Desta forma a correção de acidez do solo com silicatos, além de elevar o pH, poderia

disponibilizar o P pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (VOLKWEISS & RAIJ, 1977).

Segundo Alcarde (1992) a ação neutralizante do silicato pode ser explicada de acordo com as seguintes reações:



A reação (1) caracteriza a dissociação comum a qualquer substância iônica em presença de água. Em (2) e (3) os ânions silicatos atuam como bases de Bronsted-Lowry, capturando prótons dissolvidos na água do solo. A base SiO_3^{-2} é fraca ($K_b = 1,6 \times 10^{-3}$), entretanto, sua capacidade de receber H^+ é maior que a base CO_3^{-2} ($K_b = 2,2 \times 10^{-4}$), resultante da dissociação do calcário. O destino dos cátions Ca^{+2} da reação (1) é o complexo sortivo do solo onde deslocam o Al^{+3} para a fase aquosa. Na reação (3) o composto H_2SiO_3 não se estabiliza, tendo que combinar com uma molécula de água para formar o ácido monossilícico, forma solúvel de sílica nos solos, pH 4 a 9.

Após, concluída a ação alcalinizante, o H_4SiO_4 , com a elevação do pH devido a presença de OH^- na solução o ácido monossilícico ioniza-se, ficando com carga negativa e podendo ser adsorvido pelos óxidos de Fe e Al da fração argila, impedindo ou dificultando a adsorção de P, que ficará mais disponível em solução.

3 ARTIGO CIENTÍFICO: DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO PELA INTERAÇÃO DO CALPOT E SILÍCIO

RESUMO

Com o objetivo de melhorar a disponibilidade do fósforo no solo foram realizados dois experimentos, o primeiro a nível laboratorial e o segundo, em casa de vegetação, utilizando a soja como planta teste. Em laboratório foram aplicados os elementos P e Si em doses crescentes. No tratamento completo foi aplicado o CALPOT, (calcário dolomítico + cloreto de potássio) com dose calculada para se atingir um índice de saturação no solo equivalente a: 50% de Ca, 10% de Mg, e 3% de K. Os dados obtidos após o contato (24 horas) das amostras com os tratamentos foram submetidos à regressão múltipla, ajustando-se a superfície de resposta para as variáveis em estudo. Em casa de vegetação foram estudados sete tratamentos com cinco repetições, sendo 1) Testemunha; 2) CALPOT + P + Si; 3) CALPOT + P; 4) CALPOT + Si; 5) Si + P; 6) Calcário; 7) CALPOT. Os cátions básicos foram aplicados para estabelecer 50% de Ca, 10% de Mg e 3% de K, o P aplicado foi de 50 mg kg⁻¹ e Si foi duas vezes a dose de P. Observou-se que o tratamento completo a nível laboratorial diminuiu a adsorção de fósforo. Em casa de vegetação o tratamento completo estabeleceu o equilíbrio em bases, aumentou disponibilidade de fósforo no solo, assim como obteve maior peso de folhas, matéria seca total e melhor índice nutricional avaliado pelo método D.R.I.S. Portanto a co-aplicação dos elementos possibilitou menor adsorção do fósforo no solo, melhora as propriedades químicas do solo e o fornecimento de fósforo para a planta.

Termos de indexação: calagem, equilíbrio químico, escória, potássio, fósforo.

ABSTRACT: AVAILABILITY OF PHOSPHORUS IN THE SOIL FOR THE INTERACTION OF CALPOT AND SILICON

With the objective of improving the availability of phosphorus in the soil two experiments were accomplished, the first in laboratory and the second, in green house, using the soybean as test plant. At laboratory P and Si were applied at crescent dosage. As complet tratment CALPOT was used in order to reach the base equilibrium for 50% Ca, 10% Mg and 3% K, using dolomitic lime and potassium choride. The data obtained after the contact (24 hours) of the samples with the treatments were submitted to the multiple regression. At green house seven treatments with five repetitions were studied, being 1) control; 2) CALPOT + P + Si; 3) CALPOT + P; 4) CALPOT + Si; 5) Si + P; 6) lime; 7) CALPOT. The basic cátions were applied to establish 50% of Ca, 10% of Mg and 3% of K, the applied P was 50 mg kg⁻¹ and Si two fold of P dose. It was observed that the complete treatment at laboratory reduced the P adsorption. At green house the complete treatment

established the balance in bases, it increased the availability at P in the soil, as well a larger weight of leaves, total dry matter and better nutrition balance index according to D.R.I.S.. Therefore the co-application of these elements made possible smaller adsorption of P in the soil, it improves the chemical properties of the soil and the phosphorus supply to the plant.

Indexation terms: lime, chemical balance, scum, potassium, phosphorus.

INTRODUÇÃO

Os fatores que influenciam o crescimento vegetal são genéticos e ambientais, sendo os fatores ambientais um conjunto de condições externas que afetam a vida e o desenvolvimento de um organismo. Os fatores ambientais são temperatura, umidade, energia radiante, composição da atmosfera, conteúdo de gases do solo, reação do solo, fatores bióticos e suprimento de nutrientes minerais (Tisdal; Nelson, 1974). O suprimento de nutrientes, por sua vez, depende, entre outros fatores, do tipo de solo.

O Brasil é um país com grande diversidade de solos, que se caracterizam por apresentar argilas de baixa atividade, provenientes da alta intemperização (Casagrande et al., 2003). A baixa fertilidade dos solos agricultáveis é caracterizada pela elevada acidez e baixo teor de nutrientes como Ca, Mg, K e P. Nos solos ácidos, o complexo de troca contém apreciável quantidade de alumínio adsorvido e significativa quantidade de ferro e manganês. Estes íons combinam-se com fosfatos para formar compostos insolúveis de alumínio, ferro e talvez de manganês (Parfitt, 1978). Assim, as doses de P para se atingir a capacidade máxima de adsorção (CMAP) pode chegar a 4.000 mg kg⁻¹ de solo (Vanderdeelen et al., 1973).

Na literatura são encontrados vários estudos que possibilitam melhorar a disponibilidade de P nos solos (Motta et al., 2002; Casagrande & Camargo, 1997; Leite, 1997; Iyamuremye; Dyck, 1996; Muniz et al., 1985; Fassbender, 1987), sendo a aplicação de silício uma delas. O ânion silicato pode ser adsorvido à fase sólida do solo, competindo pelos mesmos sítios de adsorção que o fósforo, impedindo ou dificultando a adsorção deste, ficando disponível em solução (Obihara; Russel, 1972). Assim a correção da acidez do solo com silicatos, além de elevar o pH, poderia disponibilizar o P, pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (Volkweiss; Rajj, 1977).

Além do fósforo, há a necessidade da reposição de outros elementos essenciais, de forma a melhorar a disponibilidade destes no solo, para que o fornecimento de determinado elemento à planta não fique prejudicado (Abreu et al., 2001; Kaminski, 2000; Veloso et al., 1992). A utilização de corretivos da acidez auxilia na diminuição do problema da adsorção de P pelos solos, pois com a elevação do pH, ocorre um aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio, aumento da concentração de OH^- na solução do solo, reduzindo a adsorção do fosfato na fase sólida do solo (Casagrande; Camargo, 1997; Vasconcellos et al., 1975; Raji, 1991; Leal; Velloso, 1973). A aplicação de calcário e fósforo facilita uma maior disponibilidade de P, ao diminuir a força com que o P é retido no solo (Alvarado; Cajuste, 1993; Kaminsk, 1983). Ressalta-se que a calagem aumenta a CTC – efetiva, reduz as perdas por lixiviação, entretanto a relação dos teores disponíveis entre Ca + Mg/K, ou outra relação que envolva os três cátions, devem permanecer em equilíbrio, para que não ocorra limitação de absorção (Mascarenhas et al., 1988; Mascarenhas et al., 2000). Dias; Fioretto (2002), combinaram uma fonte de potássio com calcário, obtendo um produto denominado CALPOT. A aplicação do CALPOT alterou às relações de equilíbrio no solo, previamente calculados para 50% de Ca^{+2} , 15% de Mg^{+2} e 3% de K^+ , no complexo sortivo.

O objetivo deste trabalho foi testar uma mistura de elementos químicos (Ca, Mg, K, P e Si) de modo que proporcionassem a correção da fertilidade química e a melhora da disponibilidade de P no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Análises Físico-químicas

Foi utilizado um Latossolo Vermelho Distroférrico coletado na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina – UEL – Londrina-PR, (23° 19' S; 51° 11' W) coletado na profundidade entre 60 - 70 cm. O material foi seco ao ar, (TFSA) e passado em peneira de (ABNT10) e submetido às análises físicas e químicas (Pavan et al., 1992; Embrapa, 1997). O silício foi determinado segundo Korndörfer et al. (1999) com as seguintes modificações: empregou-se em tubo ependorf, 0,4 g de

solo passado em peneira 0,3 mm (ABNT 50) e 2 mL de ácido acético 0,5 mol L⁻¹. Os tubos em triplicata foram agitados durante 1 hora e deixados decantar durante 16 horas. A determinação do Si foi realizada misturando-se 1 mL do sobrenadante obtido com 0,1 mL da solução sulfo-molíbdica 7,5%. Após 10 minutos acrescentou-se 0,2 mL de ácido tartárico 20% e, após 5 minutos, 1 mL de ácido ascórbico 0,3%. A leitura foi feita após uma hora em espectrofotômetro em 660 nm. A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) foi realizada segundo Olsen & Watanabe (1957) utilizando tubos ependorf e solo passado em peneira 0,3 mm (ABNT 50) para o estudo de adsorção, empregando-se 24 horas de agitação e 16 horas de decantação. O fósforo não detectado no sobrenadante foi considerado adsorvido. Os dados obtidos em três repetições foram ajustados à equação linear da isoterma de Langmuir. As características do solo são apresentadas no Quadro 1.

Foram realizados dois experimentos, sendo que o primeiro visou avaliar a reação do solo, desenvolvido em laboratório e o segundo um teste com a planta e desenvolvido em casa de vegetação.

ATRIBUTOS	SOLO
pH em água	5,3
pH em CaCl ₂	5,1
P (mg dm ⁻³) ^{1/}	0,91
K (cmol _c dm ⁻³)	0,03
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,30
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,31
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,20
H ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,41
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4,61
CO (g Kg ⁻¹) ^{2/}	4,82
V %	36,38
S (SO ₄ ⁻²) (mg dm ⁻³)	80,55
Mn (mg dm ⁻³)	15,60
Fe (mg dm ⁻³)	38,0
Cu (mg dm ⁻³)	14,45
Zn (mg dm ⁻³)	0,46
B (mg dm ⁻³)	0,05
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ^{3/}	266
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ^{3/}	177,5
SiO ₂ (g kg ⁻¹) ^{3/}	94,9
CMAF (mg kg ⁻¹) ^{4/}	3000
Si solúvel em água (mg dm ⁻³)	18,03
Si solúvel em ácido (mg dm ⁻³)	14,09
Areia (g kg ⁻¹)	7,2
Silte (g kg ⁻¹)	143,6
Argila (g kg ⁻¹)	849,2

^{1/}Extrator de P, Mehlich-I; ^{2/}CO= carbono orgânico; ^{3/}óxidos do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997); ^{4/}CMAF=capacidade máxima de adsorção de fósforo.

Quadro 1: Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.

Reação do solo

Estudou-se a capacidade do solo em adsorver fósforo. Foram realizados dois ensaios com adição de P e Si. O primeiro ensaio, sem adição de CALPOT e o segundo com adição de CALPOT. Foram adicionados em tubos ependorf, capacidade 2 mL, 0,2 g de solo, KH₂PO₄ na doses de 0, 50, 100, 150, 250 e 500 mg kg⁻¹ de solo, Si como silicato de sódio (NaSiO₃) nas doses 0, 50, 100, 150, 250 mg kg⁻¹ de solo e Ca, Mg e K suficiente para estabelecer o equilíbrio de 63% de saturação, sendo 50% de Ca, 10% de Mg e 3% de K segundo Albrecht (1996), utilizando como fonte de Ca e Mg, o calcário calcítico (43,12% CaO, 0,67% MgO) e o dolomítico (28,7% CaO, 19,04% MgO), e K - KCl (62% K₂O), sendo que os produtos

foram passados em peneira com abertura 0,3 mm (ABNT 50). Os tubos foram agitados durante 24 horas em agitador vertical, em seguida os tubos foram deixados em repouso, durante 12 horas para decantação. O sobrenadante foi retirado e analisou-se o fósforo em equilíbrio em solução. Ao solo, foi adicionado extrator de Mehlich-I na proporção de 1:10, procedendo à análise do P segundo Embrapa (1997). O fósforo detectado na solução após 24 horas de agitação e pelo extrator de Mehlich-I foi considerado disponível para a planta. Os dados foram submetidos à análise de regressão múltipla, ajustando-se superfícies de resposta para as variáveis em estudo, em função das concentrações de P e Si adicionadas nos ensaios.

Efeito sobre a planta

O experimento em casa de vegetação constou de sete tratamentos com cinco repetições, sendo que cada tratamento, foi incubado com 15 kg de solo em recipiente aberto, durante 60 dias à temperatura ambiente e 80% de umidade. Os tratamentos constaram de: 1) testemunha; 2) CALPOT + Si + P; 3) CALPOT + P; 4) CALPOT + Si; 5) Si + P; 6) Calcário; 7) CALPOT. A dose Ca, Mg e K aplicada foi estabelecida para se atingir um índice de saturação de 63%, sendo 50% de Ca, 10% de Mg e 3% de K, como definido no estudo de adsorção. A dose de P foi 50 mg de P por kg^{-1} de solo, utilizando como fonte de fósforo um resíduo industrial, denominado Fosfato Decantado – RLT2, tendo 20% de P_2O_5 solúvel em CNA, 20% de Ca e 0,7% de S. A dose de Si foi duas vezes a dose de P. O silício utilizado foi fornecido pela Silifertil Ambiental Ltda (Quadro 2). Todos os elementos foram passados em peneira com abertura 0,3 mm (ABNT 50).

Elementos Químicos												
Macronutrientes(g kg^{-1})						Micronutrientes(mg kg^{-1})						
Ca	Mg	K	P	S	Si	Zn	Fe	Mn	Cu	B	Mo	Co
400	90	9	10	9	420	700	16	29	300	150	100	70

Quadro 2: Resultado médio das análises químicas (teores totais) da escória silicatada de siderurgia utilizada como fonte de silício.

O solo foi amostrado após o término da incubação (três repetições), para a realização das análises de pH, P, Al, Ca, Mg e K (Pavan et al., 1992) e Si segundo (Korndörfer et al.; 1999) com as modificações já citadas. Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo (SAS) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%.

O solo incubado com cada tratamento foi colocado em vaso de plástico com capacidade máxima de 4 kg, recebendo, cada um, 3 kg de solo, equivalendo a uma densidade de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$. Utilizou-se como planta indicadora a soja, *Glycine max* L., cultivar BRS 133, cujas sementes foram cedidas pela Embrapa-CNPQ. Foram semeadas quatro sementes por vaso, deixando duas plantas por vaso após desbaste. Os vasos foram irrigados em turnos de rega para manter a umidade do solo a 70% do volume de poros. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 5 repetições.

Aos 40 dias após a semeadura, as plantas foram cortadas rente ao solo, separadas em raiz, caule e folha e secas a 65°C até peso constante, em estufa com ventilação, em seguida avaliou-se matéria seca das raízes e parte aérea. Para as análises químicas, os materiais foram moídos e peneirados. Foi realizada digestão nítrico-perclórica 1:4 para análise de macro e micro nutrientes; e sulfúrica, para nitrogênio. Para a análise de silício nas plantas de soja utilizou-se metodologia segundo Bataglia et al. (1983) com algumas modificações: pesou-se 0,2 g da amostra acrescentando-se 3 mL da solução nitro-perclórica 1:4. Os tubos foram colocados em bloco digestor durante 1 hora a 200°C , até completa digestão. Em seguida, 1 mL de NaOH (50%) foi adicionado levando-se novamente os tubos ao bloco digestor durante meia hora a 100°C . O material digerido foi completado para 5 mL e procedeu-se a leitura em espectrômetro de emissão de plasma modelo ICAP – 61E, Thermo Jarrell Ash Corporation. As raízes foram retiradas do solo, lavadas, secas e pesadas.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo (SAS) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Com os resultados de macro e micro nutrientes obtidos das plantas foi realizado o D.R.I.S., método de diagnóstico do estado nutricional das plantas, realizado pela LABORSOLO (Central de Análises Agronômicas Ltda, Londrina, PR).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Reação do solo

Observaram-se altos valores para os coeficientes de determinação quando ajustada a superfície de resposta para o fósforo adsorvido ao solo, Mehlich-I e fósforo disponível, em ambos os tratamentos (Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6).

O gráfico da superfície de resposta para o fósforo adsorvido (Figuras 1 e 2) mostrou que, o solo utilizado tem um grande poder de adsorção, pois, independente do tratamento utilizado, o fósforo adicionado foi praticamente todo adsorvido. Observando os dois gráficos de superfície para o fósforo adsorvido, destaca-se o efeito da adição de CALPOT, onde houve menor adsorção. Quando subtrai os valores do P adicionado do P adsorvido obtêm-se o P na solução de equilíbrio (remanescente), este aumenta quando é feita a adição de CALPOT, passando de 73 mg kg^{-1} para 134 mg kg^{-1} , considerando a maior dose.

$$P_{\text{adsorvido}} = 1,60332 + 0,72036 \cdot P + 0,00017471 \cdot (P^2) + 0,00039841 \cdot (P \cdot Si)$$

$$R^2 = 0,997$$

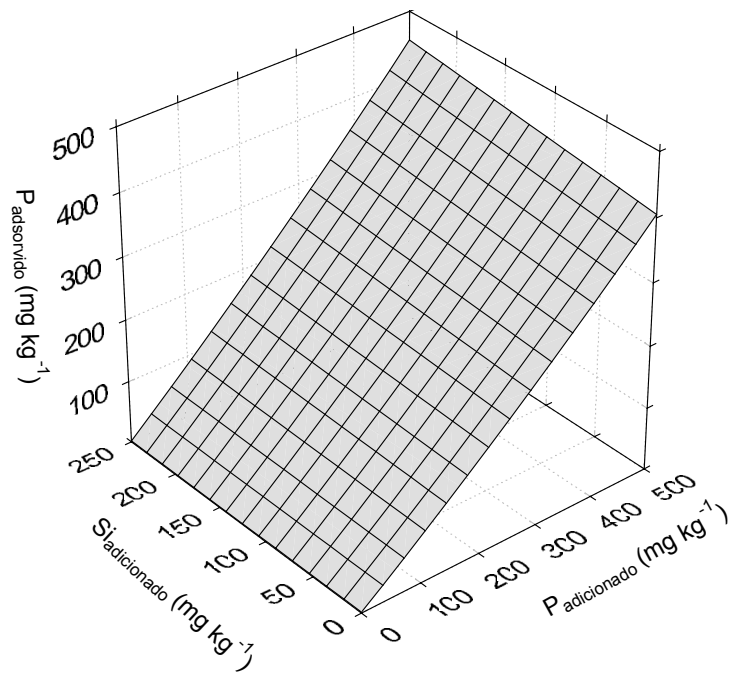


Figura 1: Superfície de resposta para o fósforo adsorvido em função das doses de P e Si adicionadas sem CALPOT.

$$P_{\text{adsorvido}} = 3,23161 + 0,81189 \cdot P - 0,00016363 \cdot (P^2) - 0,00010899 \cdot (Si^2)$$

$$R^2 = 0,997$$

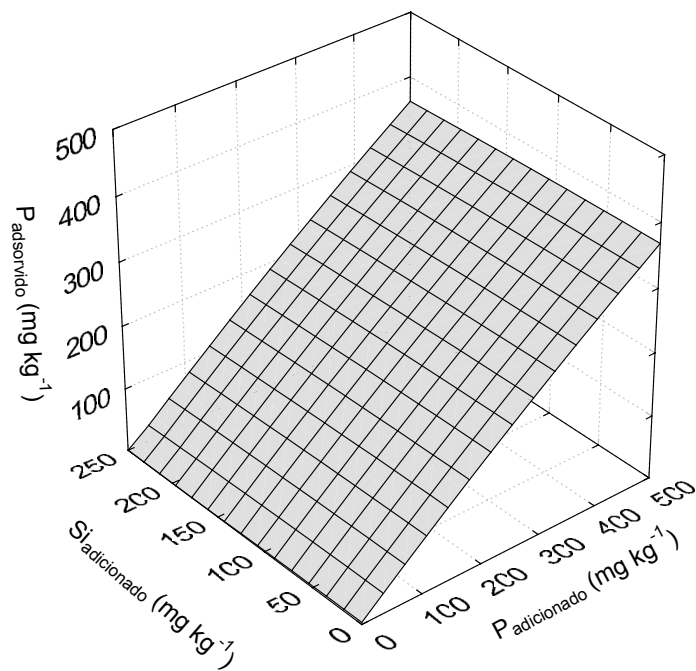


Figura 2: Superfície de resposta para o fósforo adsorvido em função das doses de P e Si adicionadas com CALPOT.

Após realizado o processo de adsorção do P no solo, foi utilizado o extrator de Mehlich-I para quantificar o P em solução disponível para a planta. Quando utilizado o extrator de Mehlich-I sem adição de CALPOT, (Figura 3), observou-se que os teores de P extraível foram reflexo da aplicação de P, entretanto a concentração de P decresce em função do aumento das concentrações de Si, isto pode ser observado através da interação P-Si. Os maiores teores de P no solo, pelo extrator Mehlich-I, ocorreram nas concentrações elevadas de P, associadas às concentrações baixas de Si. Leite (1997) verificou em Latossolo Roxo Distrófico, argiloso, que altos teores relativos de P em solução, influenciado pelo P aplicado na etapa anterior à saturação com Si, ocorrem também nas concentrações elevadas de P associados a concentrações baixas de Si aplicado. A diminuição do teor de P em função da adição de silício, pode ter sido ocasionada pela tendência de polimerização das unidades monômeras de $\text{Si}(\text{OH})_4$ em excesso, com formação de sílica coloidal ou amorfa, que de acordo com Oliveira (1984), pode impedir a saída do P ou, ainda ocasionar uma adsorção do fósforo no próprio polímero de sílica. Em seu estudo, Oliveira (1984) obteve decréscimo da quantidade de P dessorvido quando o silício foi adicionado acima de 140 mg kg^{-1} para o Latossolo Vermelho-Escuro Distrófico e 180 mg kg^{-1} para o Latossolo Roxo Distrófico.

No tratamento com adição de CALPOT (Figura 4), evidencia-se que os teores de P no solo, pelo extrator Mehlich-I, aumentam também de forma crescente para as concentrações de P adicionadas. O silício não influenciou o teor de P no solo, isto é verificado pelo aumento do teor de P_{Mehlich} , respondendo a incrementos lineares das doses de P adicionada. Neste caso, a adição de CALPOT mostrou-se novamente eficiente em manter o fósforo dessorvido, o que possibilitou o aumento do teor de P extraído por Mehlich. Pode-se inferir que a adição de CALPOT, simultaneamente com o Si e o P, auxiliou na disponibilidade do P, não deixando que ele passasse para formas não disponíveis, Al-P e Fe-P.

$$P_{\text{Mehlich}} = -1,51441 + 0,265631 * P - 0,0002079 * (P^2) - 0,0003238 * (PSi)$$

$$R^2 = 0,902$$

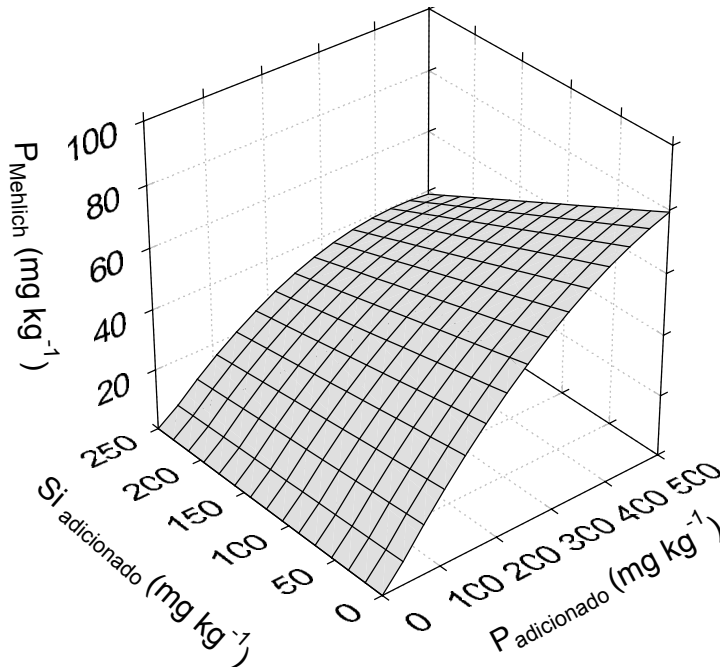


Figura 3: Superfície de resposta para o fósforo extraído por Mehlich-I em função das doses de P e Si adicionadas, sem CALPOT.

A adição de calcário com o Si, formando silicato de cálcio, produziria ânions neutralizantes, como OH^- e H_3SiO_4^- , proporcionando a adsorção destes com os óxidos, deixando o H_2PO_4^- em solução. Com o aumento na concentração das cargas negativas na solução do solo, tornando a carga da superfície do adsorvente mais negativa do que o valor em que ocorre a adsorção do P, possibilitaria desta forma o P em solução (Leal e Velloso, 1973). A adição de cátions formando fosfato de Ca e de K hidratado, relativamente solúveis, tornaria o P disponível. Leal e Velloso (1973) confirmam que a utilização da calagem resulta não só na redução da adsorção de fosfato, como também na reversibilidade do fosfato adsorvido. Os resultados aqui apresentados mostram que é possível a aplicação da mistura de P com calcário. É sabido que o extrator de Mehlich extrai muito mais as formas de P ligadas a cálcio do que as formas ligadas a Fe e Al. Os resultados das Figuras 3 mostra que o P adicionado sem CALPOT foi menos recuperado pelo extrator, já a adição de CALPOT na recuperação de P mostrou-se linear com a adição de silício,

sendo mais evidente a formação de P-Ca do que P-Fe ou P-Al. Neste caso é mais fácil admitir que o P extraído por Mehlich está mais prontamente disponível às plantas do que as formas ligadas a Fe e Al.

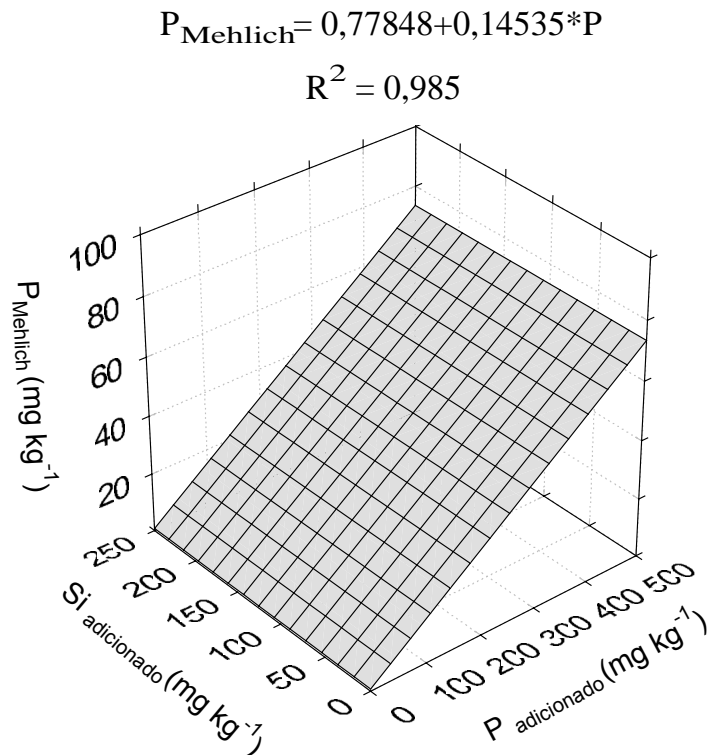


Figura 4: Superfície de resposta para o fósforo extraído por Mehlich-I em função das doses de P e Si adicionadas com CALPOT.

Com a superfície de resposta para o fósforo em solução, obtido, através da soma do P pelo extrator de Mehlich e o remanescente (Figura 5 e 6), após o processo de adsorção, foi evidenciado o decréscimo do teor de P no solo com o aumento da concentração de Si, para o tratamento sem CALPOT (Figura 6). O pequeno acréscimo no teor de P comparado com os resultados pelo extrator de Mehlich, indica que praticamente não restou P na solução após incubação (24 horas), sendo quase todo fósforo adsorvido. A quase total adsorção do P adicionado na incubação é justificada pelo elevado teor de óxidos de Fe e Al, comprovando se tratar de um solo altamente intemperizado e conseqüentemente com alta CMAP (Quadro 1).

Com adição de CALPOT (Figura 6), denota-se um aumento do P disponível em função do aumento das doses de Si e P. Pode-se inferir com estes resultados, que o teor de P disponível aumenta com a aplicação do CALPOT, e o silício viabiliza a manutenção do P em solução.

$$P_{\text{solução}} = -0,79276 + 0,272379 * P - 0,0001632 * (P^2) - 0,0003984 * (PSi)$$

$$R^2 = 0,923$$

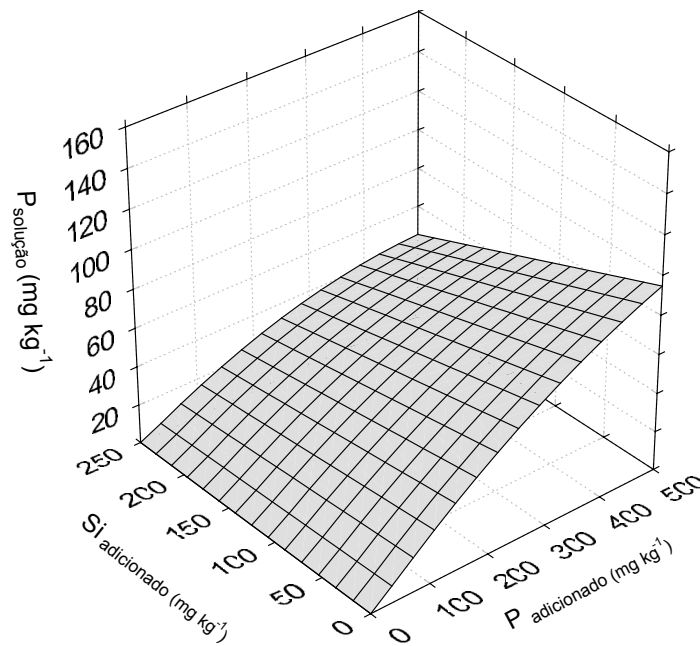


Figura 5: Superfície de resposta para o fósforo em solução em função das doses de P e Si adicionadas sem CALPOT.

$$P_{\text{solução}} = -0,19990 + 0,155492 * P + 0,0002154 * (P^2) + 0,0001405 * (Si^2)$$

$$R^2 = 0,983$$

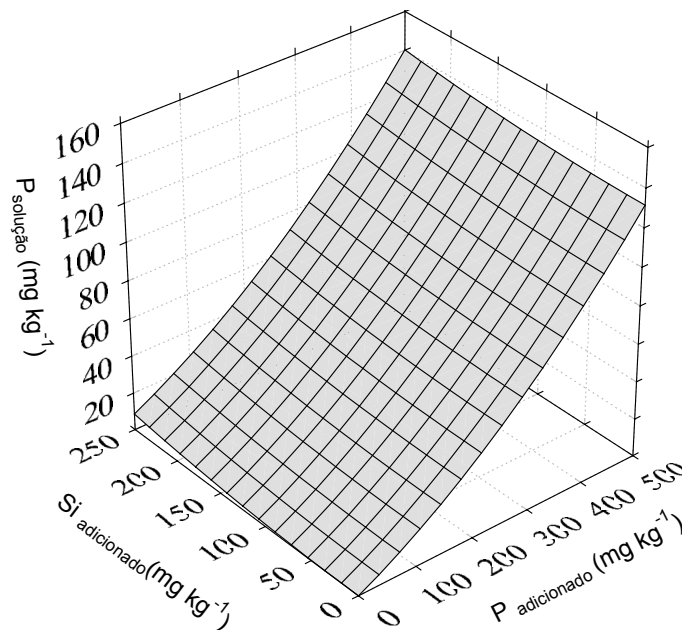


Figura 6: Superfície de resposta para o fósforo em solução em função em função das doses de P e Si adicionadas com CALPOT.

Efeito sobre a planta

Os resultados do segundo experimento revelaram as alterações a que foram submetidos os elementos do complexo sortivo do solo (Quadro 3). A proposta foi elevar a saturação em 63%, sendo 50% de Ca, 10% de Mg e 3% de K. Para os tratamentos CALPOT + P + Si, CALPOT + P e CALPOT + Si os teores estão pouco acima do proposto, devido a adição do silicato de Ca (Quadro 2) e do resíduo de P, os quais continham algum teor de Ca e Mg. O tratamento Si + P revelou a presença dos elementos Ca e Mg no silicato de Ca e no resíduo de P, pois a adição de P e Si foi suficiente para elevar os elementos nos teores propostos, evidenciando, que a utilização dos resíduos industriais aqui testados serviram não só como fonte de Si e P, mas também como fonte de Ca e Mg. Efeito semelhante foi obtido por Coelho, (1998) e Pereira, (2003), onde os aumentos de Ca e Mg refletiram-se na soma de bases para o tratamento com escória e termofosfato, demonstrando também o efeito corretivo do produto.

Embora não tenha sido objetivo avaliar a saturação de bases para o tratamento Si + P, ele atingiu o valor proposto para o tratamento CALPOT + P + Si. Atribui-se este aumento à utilização da escória, a qual proporciona elevação do pH e em consequência diminuição do Al^{+3} . Segundo Alcarde (1992), as escórias possuem propriedades corretivas semelhantes às do calcário. Observa-se também, que no tratamento Si + P, onde se teve adição de escória e do fosfato decantado, não foi suficiente para elevar o K no teor proposto. Os tratamentos CALPOT + P + Si, CALPOT + P, CALPOT + Si e CALPOT que receberam o K, na forma de CALPOT, atingiram o teor pretendido, mínimo de 3%.

Observou-se que o CALPOT é uma mistura eficiente para o fornecimento do Ca, Mg e K, pois em todos os tratamentos em que foi utilizado, promoveu as alterações propostas no solo. O equilíbrio proposto para os cátions básicos aplicados ao solo através do CALPOT foi estabelecido, não ocorrendo nenhuma forma de competição entre os íons presentes. Isto foi possível, pois a forma do Ca e do Mg constituintes, é pouco solúvel, necessitando de um período maior para a solubilização. Já o K aplicado provinha de uma fonte mais solúvel, o que permitiu sua retenção no complexo de troca antes do Ca e Mg, desta forma não comprometendo sua disponibilidade, o que não ocorreria se todos os compostos tivessem a mesma solubilidade. Por ser um íon de carga menor, o K iria competir com o Ca e Mg, que possuem maior carga, ficando retidos no complexo de troca em quantidades maiores, prejudicando o fornecimento do K, que estaria susceptível a outros processos no solo, como a lixiviação, não sendo absorvido pela planta.

Houve redução na percentagem de Al trocável nos demais tratamentos em comparação à testemunha, evidenciando-se a necessidade da correção da acidez do solo e a eficácia de tratamento CALPOT + P + Si. No tratamento Si + P, foi possível comprovar a ação corretiva da escória, pois houve considerável redução de Al em comparação à testemunha.

Tratamentos	Elementos (%)			
	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³
TESTEMUNHA	0,41D	32,00G	3,23E	13,52A
CALPOT + P + Si	3,59B	66,57A	14,05A	0,35C
CALPOT + P	3,86A	62,01B	12,92B	0,00D
CALPOT + Si	3,59B	58,14D	13,81A	0,35C
Si + P	0,69C	53,72F	9,94D	2,46B
CALCÁRIO	0,41D	56,35E	11,98C	0,35C
CALPOT	3,86A	60,08C	13,36AB	0,35C
C.V.(%)	0	1,33	3,06	4,79
D.M.S.	0	1,48	0,69	0,23

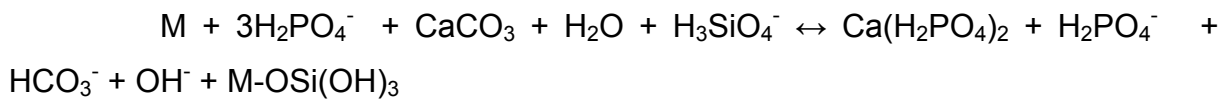
Médias com letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 3: Saturação do complexo de troca do solo por cátions básicos e Al⁺³, após incubação de 60 dias com os respectivos tratamentos.

Apesar dos tratamentos CALPOT + P + Si, CALPOT + P, CALPOT + Si, Calcário e CALPOT diferirem estatisticamente no valor de pH (Quadro 4), apresentaram uma mesma faixa de interpretação agrônômica. Pode-se inferir que, com exceção da testemunha e do tratamento Si + P, os demais estão em condições viáveis para o bom desenvolvimento radicular (Medina, 1991; Malavolta; Kliemann, 1985). Entretanto, é indispensável a observação de outros fatores que irão favorecer não só o desenvolvimento da raiz, mas a planta como um todo.

O teor de P no solo após incubação é observado no Quadro 4. Os tratamentos Testemunha, CALPOT + Si, Calcário e CALPOT que não receberam adição de P, não diferiram estatisticamente. O maior teor de P disponível foi obtido no tratamento CALPOT + P + Si. Comparando-se o tratamento CALPOT + P + Si, com o tratamento CALPOT + P que contém os elementos convencionalmente usados na agricultura, notou-se que a adição de Si influenciou positivamente a disponibilidade do P no solo. Isto indica que os produtos iniciais da reação solo-fertilizante são influenciados pelo material corretivo durante as reações da dissolução do fosfato com os componentes do solo. O tratamento Si + P, onde não ocorreu a aplicação do CALPOT, teve boa disponibilidade do fósforo. Entretanto, devido à falta de equilíbrio entre os cátions básicos e o baixo pH, não favoreceu um teor mais elevado. Pode-se admitir que a aplicação dos elementos em conjunto, como o calcário, o potássio, o fósforo e o silício, não diminuiu a disponibilidade do P, mas possibilitou que o mesmo se tornasse mais solúvel. Kaminski (1983) revelou

também que a melhor forma de adubação fosfatada para solos argilosos, seria co-aplicado ao calcário. A co-aplicação do fosfato ao corretivo, proporcionaria dissolução concomitante e interações entre seus produtos, formando, predominantemente, fosfatos secundários menos estáveis, e mais disponíveis e, ao mesmo tempo, impedindo, ou diminuindo, as recombinações do fósforo com os componentes ácidos dos solos, superfícies de óxidos hidratados de ferro e alumínio. O desempenho no aumento do teor de P na solução do solo pode ser expresso pela provável reação, junto com o efeito do silício em ocupar os sítios de adsorção:



onde M = hidróxidos Fe ou Al

O teor de Si solúvel no solo, Quadro 4, não é apenas influenciado pela adição do mesmo, mas também pela adição dos elementos que estabelecem o equilíbrio químico do solo, proposto no trabalho, pois o tratamento CALPOT que não teve adição de Si não difere do tratamento CALPOT + P + Si onde adicionou-se Si e em ambos os tratamentos os cátions estavam equilibrados. Comparando os resultados dos tratamentos, Calcário, testemunha e CALPOT, evidencia, que a concentração de silício solúvel deve ser governada pela presença dos cátions em equilíbrio e pelo aumento de pH. Não se pode obter aumento da concentração de Si no solo pela adição do mesmo, talvez pelo silício estar participando das reações de adsorção ou pelo fato de estar sendo precipitado, após a junção dos monômeros de silício, na forma de silicato insolúvel. Ou ainda porque a quantidade de silício solúvel suportada por este solo fique em média na faixa de $17,50 \text{ mg kg}^{-1}$ de solo. O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a principal espécie química de silicato em solução, em altas concentrações, ultrapassando $120 \text{ mg SiO}_2 \text{ dm}^{-3}$, passa do estado de coordenação quatro (tetraédrica) e assume coordenação seis (octaédrica), o composto hexacoordenado polimeriza-se e a partir do polímero formado, uni-se a unidades de H_4SiO_4 onde ocorre a precipitação. (Mckeague; Cline, 1963).

Tratamentos	Elementos (mg dm ⁻³)		pH
	P	Si	
TESTEMUNHA	0,89D	15,87C	5,3F
CALPOT + P + Si	15,62A	17,73A	6,4B
CALPOT + P	9,90B	17,09B	6,1D
CALPOT + Si	1,03D	17,13B	6,4B
Si + P	6,64C	17,23B	5,7E
CALCÁRIO	0,92D	15,41D	6,5A
CALPOT	0,92D	17,67A	6,3C
C.V.%	5,95	0,79	0,33
DMS	0,613	0,268	0,041

Médias com letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 4: Resultados das análises químicas para fósforo, silício e pH do solo após incubação de 60 dias com os tratamentos.

Embora a soja não seja uma planta indicadora para a absorção de silício, pode-se atribuir à maior absorção de Si na testemunha, Quadro 5, justamente pela falta dos nutrientes essenciais. Os tratamentos CALPOT + P + Si e Si + P, que receberam doses de Si, não diferiram estatisticamente entre si, apresentando uma boa absorção de Si. Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira et al, (2003), com tratamento do solo com a escória, que apresentou maiores teores de Si nas folhas do tomateiro.

O conteúdo de K absorvido pela planta, Quadro 5, foi maior nos tratamentos CALPOT + P + Si, CALPOT + P, CALPOT + Si e CALPOT, indicando a necessidade da aplicação do nutriente no solo. A adição de P e/ou Si no produto CALPOT não interferiu na disponibilidade do K. Isto indica que o tratamento CALPOT + P + Si poderá ser utilizado como fonte de potássio.

Tratamentos	Elementos						
	N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	S	Si
TESTEMUNHA	31,08AB	1,32C	8,43B	12,70A	4,81C	1,61B	6,84A
CALPOT + P + Si	35,33A	2,08A	24,42A	19,40A	6,03AB	1,97A	5,55AB
CALPOT + P	31,22AB	1,88A	21,01A	16,38A	5,14ABC	1,72AB	3,57CD
CALPOT + Si	30,59AB	1,29C	23,36A	17,09A	5,12ABC	1,66AB	4,37BC
Si + P	26,16B	1,79AB	8,49B	18,89A	6,40AB	1,62AB	5,29AB
CALCÁRIO	29,08AB	1,26C	8,27B	18,46A	6,82A	1,54B	2,69D
CALPOT	26,79B	1,39BC	20,51A	14,08A	4,19C	1,56B	3,25CD
C.V.(%)	13,76	13,55	16,05	24,27	16,57	10,56	18,08
D.M.S.	8,29	0,42	5,26	8,14	1,83	0,35	1,63

Médias com letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 5: Conteúdo (g planta⁻¹) de macroelementos nas folhas da soja coletadas aos 40 dias após semeadura nos tratamentos testados em Latossolo Roxo Distroférico.

Os conteúdos de B, Fe e Zn nas folhas de soja não diferiram estatisticamente entre os tratamentos (Quadro 6), indicativo de que o produto do tratamento CALPOT + P + Si não alterou a absorção destes elementos. O cobre, elemento essencial na síntese de compostos que participam do metabolismo, foi absorvido em maior conteúdo no tratamento completo, seguido pelo tratamento CALPOT + Si, que continha silício e calcário, indicando que o silício pode auxiliar na absorção deste elemento.

Maior absorção de Mn pela planta, se deu na testamunha (Quadro 6), onde o pH do solo foi de 5,3 (Quadro 1). A disponibilidade de Mn no solo é controlada principalmente pelo pH e pelo potencial de oxidação dos solos (Lindsay, 1982). À medida em que houve aumento de pH ocorreu menor absorção do Mn.

Tratamentos	Elementos				
	B	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺
TESTEMUNHA	82,49A	7,14AB	154,18A	502,61A	71,47A
CALPOT + P + Si	100,58A	9,18A	177,35A	370,45B	71,48A
CALPOT + P	101,82A	7,30AB	194,49A	329,96BCD	55,29A
CALPOT + Si	90,32A	5,13B	262,13A	289,76BCD	46,71A
Si + P	105,42A	5,77AB	194,78A	342,34BC	72,27A
CALCÁRIO	93,01A	7,31AB	178,57A	230,54D	55,91A
CALPOT	91,78A	6,96AB	204,13A	243,85D	53,92A
C.V.(%)	16,26	26,00	42,50	16,38	24,80
D.M.S.	31,01	3,63	166,38	108,45	30,36

Médias com letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 6: Conteúdo (mg planta⁻¹) de microelementos nas folhas da soja coletadas aos 40 dias após semeadura nos tratamentos testados em Latossolo Roxo Distroférico.

O crescimento da soja é representado pelas médias do peso do sistema radicular, de caule, de folhas e de matéria seca total (Quadro 7). Nos tratamentos CALPOT + P e CALPOT + Si, o peso de raiz não diferiu. Nestes tratamentos, foram aplicados os mesmos cátions, e apresentavam o equilíbrio proposto, mudando apenas o fornecimento de P e Si. É visto que de alguma forma o silício influenciou o desenvolvimento da raiz do mesmo modo que o fósforo, pois o conteúdo de P (Quadro 5) no tratamento CALPOT + Si, foi menor, podendo ser atribuído o efeito de desenvolvimento da raiz ao silício.

No entanto, a aplicação do tratamento CALPOT + P + Si, proporcionou o maior desenvolvimento das plantas em termos de peso seco de folhas e de matéria seca total. As plantas responderam positivamente à associação dos elementos no tratamento CALPOT + P + Si, tendo 20% mais matéria seca total que no tratamento CALPOT + P, que utiliza os elementos convencionalmente aplicados na agricultura, ou seja, aplicação de calcário, potássio e fósforo. Esta diferença pode ser observada também quanto ao acúmulo de P na parte aérea (superior em 10,6%). A superioridade do tratamento CALPOT + P + Si poderá representar também maior produção e melhor qualidade de grãos.

Tratamentos	Raízes	Caule	Folhas	Mat.Seca Total
TESTEMUNHA	0,39BC	0,41D	0,37C	1,17D
CALPOT + P + Si	0,53A	0,75A	0,71A	2,00A
CALPOT + P	0,47AB	0,62AB	0,57B	1,66B
CALPOT + Si	0,47AB	0,51BCD	0,46BC	1,45BCD
Si + P	0,39BC	0,56BC	0,56B	1,52BC
CALCÁRIO	0,35C	0,45CD	0,42C	1,24CD
CALPOT	0,38BC	0,47CD	0,44C	1,30CD
C.V.%	13,69	12,24	10,87	11,27
DMS	0,11	0,133	0,11	0,33

Médias com letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quadro 7: Matéria seca de raízes, caule, folhas e total das plantas em g/planta para os tratamentos aplicados ao solo.

Pela diagnose foliar, pode-se avaliar o estado e o equilíbrio nutricional de uma planta, uma vez que o teor do nutriente é resultante da ação e da interação dos fatores que influem em sua disponibilidade no solo e sua absorção pela planta (Silva et al., 2003). O sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (D.R.I.S.), desenvolvido por Beaufils (1973), tem sido apontado como uma alternativa para interpretação do estado nutricional das plantas (Summer, 1977), apresentando como vantagem, o fato de minimizar os efeitos de diluição e de concentração dos nutrientes (Jarrel; Beverly, 1981). Este método avalia mais precisamente as interações nutricionais informando a ordem de limitação dos nutrientes, tanto por deficiência quanto por excesso, além da intensidade da exigência. O D.R.I.S. fornece o índice de balanço nutricional (IBN), que corresponde ao somatório dos valores absolutos dos índices D.R.I.S. de cada nutriente global da planta, sendo tanto menor o seu valor quanto maior o equilíbrio na planta.

Observou-se que através da análise do D.R.I.S. foi possível estabelecer uma melhor relação entre os elementos aplicados no solo e absorvido pela planta. Os resultados do D.R.I.S. contidos no Quadro 8, revelaram que os melhores tratamentos para a nutrição da planta foram o CALPOT + P + Si e o CALPOT + P. Isto pode ser observado através do menor valor de IBN, índice de balanço nutricional, Com relação ao P, notou-se um maior desbalanço para os tratamentos que não receberam fósforo. Para o tratamento CALPOT + Si, embora o silício tenha proporcionado o desenvolvimento de raiz, pelo D.R.I.S., fica claro a deficiência de P, que apresenta um valor negativo. Os tratamentos Testemunha, Si + P e Calcário

que não receberam K^+ também revelaram sua deficiência através do DRIS para K, apresentando os índices negativos.

Elementos	Tratamentos						
	1	2	3	4	5	6	7
N	-2,53	-3,66	-3,72	-3,26	-4,70	-2,92	-3,88
P	-5,03	-2,67	-2,40	-4,38	-2,70	-4,10	-3,30
K^+	-1,65	0,57	0,48	1,37	-1,85	-1,77	0,94
Ca^{2+}	0,59	0,75	0,67	0,83	1,29	1,43	0,68
Mg^{2+}	2,26	1,82	1,69	2,57	3,21	3,95	1,46
S	-1,39	-1,24	-1,22	-0,98	-1,10	-0,88	-1,05
B	2,85	2,69	3,71	3,92	4,62	3,58	3,89
Cu^{2+}	-3,83	-3,06	-3,70	-5,51	-5,56	-3,12	-3,29
Fe^{2+}	-0,95	-0,85	-0,33	0,72	-0,11	-0,1	0,26
Mn^{2+}	7,19	3,42	3,35	3,58	3,98	2,52	2,68
Zn^{2+}	2,34	0,91	0,33	0,22	2,19	1,08	0,79
IBN	30,75	22,96	22,75	28,24	32,04	25,78	23,04
IMs	0,14	1,32	1,15	0,90	0,73	0,33	0,82

Tratamentos: 1-testemunha; 2-CALPOT + P + Si; 3-CALPOT + P; 4-CALPOT + Si; 5-Si + P; 6-Calcário; 7-CALPOT; IBN: índice de balanço nutricional, IMs: índice de matéria seca.

Quadro 8: Índice D.R.I.S., IBN e IMs nas folhas da soja coletadas aos 40 dias após semeadura nos tratamentos testados em Latossolo Roxo Distroférico.

CONCLUSÕES

1. A co-aplicação de calcário, P, K, Si, possibilita o estabelecimento do equilíbrio químico no solo.
2. O Si, co-aplicado com calcário, P e K, aumenta a disponibilidade de fósforo no solo.
3. As plantas de soja respondem de forma positiva à co-aplicação destes elementos no solo, resultando em maior peso da matéria seca total e menor IBN.

BIBLIOGRAFIA

ABREU JR., C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. **Sci. agric.**, v.58,n.4,p.813-824, 2001.

ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).

ALVARADO, J.; CAJUSTE, L. J. Encalado y retención de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. **Turrialba**, v.43, n4, p.235-241, 1993.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análises químicas de plantas**. Campinas, IAC, 1983. 48p. (IAC – Boletim Técnico, 78)

BEAUFILS, E. R. **Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS)**. Pietermaritzburg, University Of Natal, 1973. 132p. (Soil Sci. Bulletin, 1)

CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de fosfato em solos com caráter ácido avaliada por um modelo de complexação de superfície. **Revista Brasileira Ci. Solo**, v.21, p.353-360, 1997.

CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. & BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira Ci. Solo**, v.27, p.51-59, 2003.

COELHO, P. E. Da escória ao vidro. R. **Limpeza Públ.**, v.49, p.36-45, 1998.

DIAS, A. M.; FIORETTO, R. A. **Utilização do efluente da industrialização de trifuralina como fonte de potássio no solo**. Universidade Estadual de Londrina – Departamento de Agronomia, 2002. 35p. (Informe Técnico, 2).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. Química de suelos: com énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica: **Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura**, 1987, 420p.

FOUNDATION CONCEPTS BY WILLIAN A. ALBRECHT, Ph. D. The ALBRECHT Papers. Edited by Charles Walters. Acres USA, 3ed., 1996. vol.1 515p.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. **Adv. Agron.**, Orlando, v.56, p139-185, 1996.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Adv. Agron.**, v.34, p.197-224, 1981.

KAMINSKI, J. **Efeito de cinco fosfatos pré-, co- e pós-aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo em três solos ácidos**. Piracicaba, 1983. 126p. Tese (Doutorado).

KAMINSKI, J. **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas, RS, 2000. 121p. Boletim Técnico n. 4, Núcleo Regional Sul (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo).

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N.M.; SNYDER, G.H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de silício em solo cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ci. do Solo**, Viçosa, v.23, p.101-116, 1999.

LEAL, J. R.; VELLOSO, A C. X. Dessorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado II. Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.8, p.89-92, 1973.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. Viçosa, 1997. 87p. (Tese de Doutorado).

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibrium in soils**. New York, 1982, 449p.

MALAVOLTA, E.; KLIEMANN, H. J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Associação Bras. Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, 1985, 136p.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; CARMELLO, Q. A. C. et al. Calcário e potássio para a cultura de soja. **Sci. agric.**, v.57, n.3, p.445-449, 2000.

MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; MIRANDA, M.A.C; BRAGA, N.R.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. **O Agrônomo**, v.40, p.34-43, 1988.

MCKEAGUE, J. A; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. II. The adsorption of monosilic acid by other substances. **Can. J. Soil Sci.** v.43, p.83-95, 1963.

MEDINA, C. C. **Estudo da aplicação de gesso e calcário na produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), açúcar e álcool**. Botucatu, 1991. 112p. (Tese-Mestrado).

MOTTA, P. E. F.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O. VAN RAIJ, B. FURITINI, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: influência da minareologia e histórico de uso. **Revista Brasileira Ci. Solo**, v.26, p.349-359, 2002.

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES J. C. L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira Ci. Solo**, Viçosa, v.9, p.237-243, 1985.

OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Especific adsorption of the silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.23, n.1, p.105-117, 1972.

OLIVEIRA, M. G. A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíprocos de silício e fósforo em latossolo do triângulo mineiro**. Viçosa, MG, 1984. 68p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorous adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.21, p. 144-149, 1957.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Adv. Agron.**, v.30, p.1-50, 1978.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 38p. (Circular, 76)

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C. & KORNDORFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira Ci. Solo**, Viçosa, v.27, p.101-108, 2003.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, SP, Agronômica Ceres, 1991, 343p.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional do cafeeiro em resposta à adubação potássica. **Revista Brasileira Ci. Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.247-255, 2003.

SILVA, M. L. S. **Disponibilidade de fósforo em solos com aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez**. Ilha Solteira, SP, 2001. 60p. Dissertação mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira.

SUMNER, M. E. Use of the DRIS system in foliar diagnosis of crops at high yield levels. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.8, p.251-268, 1977.

TISDALE, S.; NELSON, W. **Soil Fertility and Fertilizers**. Collier Macmillan International Editions, 30. edition, 1974. 694p.

VANDERDEELEN, J.; PINO, N. I.; BAERT, L. Kinetics of phosphate adsorption in a soil derived from volcanic ash. **Turrialba**, v. 23, n. 3, p.291-296, 1973.

VASCONCELOS, C.A. et al. P em dois latossolos do Estado de MG. III - Relações entre planta, solo e P. **Revista Ceres**, Viçosa, v.22, n.119, p.22-49, 1975.

VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. de J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Sci. agric.**, v. 49, n.1, p.123-128, 1992.

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: **Simpósio Sobre Cerrado, Bases para Utilização Agropecuária**, 4, Brasília, 1976. p.317-332.

REFERÊNCIAS

- ABREU JR., C. H.; MURAOKA, T.; OLIVEIRA, F. C. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. **Sci. agric.**, v.58, n.4, p.813-824, 2001.
- ALCARDE, J. C. **Características de qualidade dos corretivos da acidez do solo.** In: SIMPÓSIO SOBRE ACIDEZ E CALAGEM, Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo, 15. Campinas, SP, 1983. p.10-31.
- ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez dos solos:** características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).
- ALVARADO, J ; CAJUSTE, L. J. Encalado y retención de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. **Turrialba**, v.43, n4, p.235-241, 1993.
- BAHIA FILHO, A F. C.; BRAGA, J. M. Fósforo em latossolos do estado de Minas Gerais. I. intensidade e capacidade tampão de fósforo. **Experientiae**, v.19, p.18-32, 1975.
- BAHIA FILHO, A F. C.; BRAGA, J. M.; RESENDE, M. & RIBEIRO, A. C. Relações entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do planalto central. **Revista Brasileira Ci. Solo**, v.7, p.221-226, 1983.
- CARVALHO, R. **Interações silício-fósforo em latossolo vermelho-escuro e cambissolo cultivados com mudas de eucalipto.** Lavras, MG, 1999. 89p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras.
- CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de fosfato em solos com caráter ácido avaliada por um modelo de complexação de superfície. **Revista Brasileira Ci. Solo**, v.21, p.353-360, 1997.
- DIAS, A. M.; FIORETTO, R. A. **Utilização do efluente da industrialização de trifuralina como fonte de potássio no solo.** Universidade Estadual de Londrina – Departamento de Agronomia, 2002. 35p. (Informe Técnico, 2).
- FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos:** com ênfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura, 1987, 420p.

FASSBENDER, H. W. Fósforo. In: **Química de solos**: com ênfase em solos da América Latina. Turrialba: Instituto Internacional de Ciências Agrícolas, 1978. p.262-307.

FORTES, J. L. O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia, do Estado do Maranhão, na correção da acidez do solo**. 1993. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 1993.

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E. Óxidos de ferro em los suelos: sus propiedades y su caracterización com ênfasis em los estúdios de retención de fósforo. **Agrociencia**, v. 1, n1, p.1-14, 1997.

HINGSTON, F.J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, v.23, n.2, p.177-192, 1972.

HOLT, P. F.; KING, D. T. The chemistry of silica surfaces. **Journal of Chemical Society**, p.773-779, 1955.

HSU, P. H. Fixation phosphate by aluminum and in acidic soils. **Soil Sci.**, v.99 p.398-402, 1965.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R. P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. **Adv. Agron.**, v.56, p139-185, 1996.

KAMINSKI, J. **Efeito de cinco fosfatos pré-, co- e pós-aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo em três solos ácidos**. Piracicaba, São Paulo, 1983. 126p. Tese (Doutorado).

KAMINSKI, J. **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas, RS, 2000. 121p. Núcleo Regional Sul, Sociedade Brasileira de Ciência Do Solo, (Boletim Técnico n. 4).

KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos, In: **NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.** Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.107-138.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G.F.; SNYDER, G.H. Efeito do silicato no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.635-641, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N.M.; SNYDER, G.H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de silício em solo cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.101-116, 1999.

LEAL, J. R.; VELLOSO, A C. X. Dessorção do fosfato adsorvido em latossolos sob vegetação de cerrado II. Reversibilidade da isoterma de adsorção de fosfato em relação ao pH da solução de equilíbrio. **Pesquisa Agropacuíria Brasileira**, Brasília, v.8, p.89-92, 1973.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. Viçosa, 1997. 87p. (Tese de Doutorado).

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; CARMELLO, Q. A. C. *et al.* Calcário e potássio para a cultura de soja. **Sci. agric.**, v.57, n.3, p.445-449, 2000.

MASCARENHAS, H.A.A.; BULISANI, E.A.; MIRANDA, M.A.C; BRAGA, N.R.; PEREIRA, J.C.V.N.A. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. **O Agrônomo**, v.40, p.34-43, 1988.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. II. The adsorption of monosilic acid by other substances. **Can. J. Soil Sci.** v.43, p.83-95, 1963.

MOTTA, P. E. F.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J. O. VAN RAIJ, B. FURITINI, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em latossolos: influência da minarelogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.349-359, 2002.

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES J. C. L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.237-243, 1985.

NASSAR, E. J.; MESSADEQ, Y.; RIBEIRO, S. J. L. Influência da catálise ácida na preparação da sílica funcionalizada pelo método sol-gel. **Química Nova**. V.25, n.1, p.27-31, 2002.

NIELSEN, M.E.; BARBER, S.A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, v.70, p.695-698, 1978.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Especific adsorption of the silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, v.23, n.1, p.105-117, 1972.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v.38, p.47-57, 1996.

OLIVEIRA, F. A. ; CARMELLO, Q. A. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Disponibilidade de potássio e suas relações com cálcio e magnésio em soja cultivada em casa-de-vegetação. **Sci. agric.**, v.58, n.2, p.329-335., 2001.

OLIVEIRA, M. G. A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíprocos de silício e fósforo em latossolo do triângulo mineiro**. Viçosa, MG, 1984. 68p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorous adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.21, p. 144-149, 1957.

PARFITT, R. L. The availability of P from phosphate-goethite binding complexes, desorption and uptake by ryegrass. **Plant Soil**, v.53, p.55-65, 1979.

PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L. Uso de corretivos da acidez do solo: experiências no Paraná. In: KAMINSKI, J. **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas, RS, 2000. p. 61-76. (Boletim Técnico n.4).

PAVAN, M. A.; TAKACHI, C. Y.; MYAZAWA, M. Estimativa da força iônica corrigida para pares de íons da condutividade elétrica da solução do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.345-347, 1995.

PINTO, M. B. A. B. A.; LOPES, A. S. Efeito residual da calagem, adubação fosfatada corretiva e gesso agrícola na dinâmica de bases e características químicas do solo e subsolo. **Ciênc. Prát.**, v.15, n. 1, p.90-102, 1991.

PRADO, R. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G. *et al.* Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.37, n.4, p.539-546, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo, e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola.**, v. 59, n.1, p.129-135, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito do calcário e da escória de siderurgia na disponibilidade de fósforo no Latossolo Vermelho-Escuro e na Areia Quartzosa. **Revista de Agricultura**, v. 74, n. 2, p. 235-242, 1999.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo, SP, Agronômica Ceres, 1991, 343p.

ROSOLEM, C.A.; MARCELLO, C.S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Sci. agric.**, v.55, n.3, p.448-455, 1998.

SHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, v.71, p.921-924, 1977.

SILVA, M. L. S. **Disponibilidade de fósforo em solos com aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez**. Ilha Solteira, SP, 2001. 60p. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira.

SOUZA, J. A.; CURI, N.; GUEDES, G. A. A. Relação entre mineralogia e adsorção-dessorção de fósforo em alguns latossolos sob cerrado do planalto central. **Ciênc. Prát.** v.15, n.1, p.103-111, 1991.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A. Soja, nutrição, correção do solo e adubação. Campinas: **Fundação Cargill**, 1992. 60p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, D. J. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York, 1985. 754p.

VASCONCELOS, C.A. et al. P em dois latossolos do Estado de MG. III-Relações entre planta, solo e P. **Revista Ceres**, v.22, n.119, p.22-49, 1975.

VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VEIGAS, I. A. de J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agrícola**, v. 49, n.1, p.123-128, 1992.

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: **Simpósio Sobre Cerrado, Bases para Utilização Agropecuária**, 4, Brasília, 1976. p.317-332.