EFEITO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO
E DO PERÍODO DE INCUBAÇÃO NA
EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS
FOSFATOS

ROBERTO TETSUO TANAKA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Takashi Muraoka

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade
de São Paulo, para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia, Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Maio - 1990

T153e Tanaka, Roberto Tetsuo
Efeito do método de aplicação e do período
de incubação na eficiência agrônômica dos fos-
fatos. Piracicaba, 1990.
122p.:il.

Tese - ESALQ
Bibliografia

1. Fosfato - Fontes 2. Fosfato - Granulo-
metrias 3. Fosfato - Métodos de aplicação 4.
Fosfato - Doses 5. Fosfato - Eficiência agro-
nômica 6. Soja I. Escola Superior de Agricul-
tura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

CDD 631.85

EFEITO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO
E DO PERÍODO DE INCUBAÇÃO NA
EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS
FOSFATOS

ROBERTO TETSUO TANAKA

Aprovada em: 07 de Junho de 1990

Comissão julgadora:

Prof. Dr Toshiaki Kinjo

Prof. Dr Antonio Enedi Boaretto

Prof. Dr Takashi Muraoka

Pesq. Dr Bernardo van Raij

Pesq. Dr Carlos Orlando Ponchio

Prof. Dr Takashi Muraoka
Orientador

Ao meu Pai
Naoichi ("in memoriam")

MINHA HOMENAGEM

À minha esposa,
Maria Aparecida

Aos meus filhos,
Eduardo, Marcelo e Régis

À minha mãe,
Miyo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr Takashi Muraoka, pela efetiva orientação, amizade e incentivo.
- Ao Pesq. Científico Dr Bernardo van Raij, pela efetiva co-orientação e pelas correções e valiosas sugestões do manuscrito desta Tese.
- À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), pela oportunidade concedida para a realização deste Curso de Pós-graduação.
- Ao Depto de Solos, Geologia e Fertilizantes da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP (ESALQ), e à Coordenadoria do Curso pela acolhida e facilidades oferecidas.
- Ao Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica (CNPq), pela concessão da Bolsa de Doutorado, sem a qual seria impossível manter-nos no Curso.
- Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), e ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), pelas dependências físicas oferecidas para a condução do ensaio em casa de vegetação e para as análises.
- Ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), pela anuência para a conclusão do Curso após o nosso ingresso ao quadro de Pesquisadores Científicos desta Instituição.
- À EMBRAPA e ao GRUPO PETROFERTIL pelo convênio entre ambos, que possibilitou o financiamento parcial dos custos da experimentação.
- Ao Sr Hirofume (Carlos) Kage, proprietário da Fazenda Planalto pela cessão da área experimental e auxílio na montagem e condução do ensaio.

- À ULTRAFERTIL S/A - Indústria e Comércio de Fertilizantes, Cubatão, pelo preparo e granulação dos fosfatos testados no campo e em casa de vegetação.
- Aos Profs das disciplinas cursadas, pelos ensinamentos, e aos colegas do Curso pela convivência e amizade.
- Ao Técnico Agrícola, Sr Roosevelt Castoril da Silva (ex-EPAMIG) pela dedicação na implantação e condução do ensaio de campo.
- Aos Pesq. Científicos, Dr Toshio Igue e José Antonio Quaggio respectivamente, pelas análises estatísticas e pela obtenção de superfície de resposta.
- Ao Pesq. Científico Dr Eduardo Antonio Bulisani pela correção do vernáculo e pela versão do Resumo para o inglês.
- Aos laboratoristas da Seção de Fertilidade do Solo do CENA e da Seção de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas do IAC, pela colaboração nas análises de solos e tecidos vegetais efetuadas.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE APÊNDICES	xiii
RESUMO	xiv
SUMMARY	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Fósforo no solo	4
2.2. Fatores da solubilização do fosfato no solo	7
2.3. Fósforo na planta	9
2.4. Respostas a fontes de fosfato	10
2.5. Respostas ao tempo de contato entre o fosfato e o solo	15
2.6. Métodos de aplicação e granulometria	20
2.7. Métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1. Experimento em casa de vegetação	28
3.1.1. O solo	28
3.1.2. Correção da acidez do solo	30
3.1.3. Os tratamentos	30
3.1.4. Delineamento experimental	32
3.1.5. Adubação, semeadura e cultivo de soja	32
3.1.6. Análises químicas das plantas e dos solos	34
3.1.7. Avaliação dos tratamentos	34
3.1.8. Análise de variância e de regressão	35

3.2. Experimento de campo	35
3.2.1. O solo	35
3.2.2. Correção do solo	36
3.2.3. Os tratamentos	37
3.2.4. Delineamento experimental	37
3.2.5. Semeadura, cultivo e colheita da soja	38
3.2.6. Amostragens e análises de folhas e solos	39
3.2.7. Análise de variância e de regressão	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. Ensaio em casa de vegetação	41
4.1.1. Análise do solo	41
4.1.2. Resposta da soja ao primeiro cultivo	48
4.1.3. Resposta da soja ao segundo e terceiro cultivos	59
4.1.4. Resposta acumulada de soja aos três cultivos	67
4.2. Experimento de campo	74
4.2.1. Análise do solo	74
4.2.2. Respostas da cultura de soja aos tratamentos	82
5. CONCLUSÕES	99
5.1. Ensaios em casa de vegetação	99
5.2. Ensaio de campo	100
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
7. APÊNDICE	114

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Resultados da análise do solo dos experimentos em casa de vegetação e de campo.....	29
2. Resultados das análises dos adubos formulados contendo os fosfatos testados no experimento em casa de vegetação, válidos para as formas de pó e grânulo.....	31
3. Resultados da análise do solo após a incubação com os fosfatos por 1 e 169 dias.....	42
4. Fósforo "disponível" extraído pelo método H_2SO_4 0,05 N, após os períodos de incubação dos fosfatos. Médias de duas análises.....	43
5. Fósforo "disponível" extraído pelo método da resina, após os períodos de incubação dos fosfatos.....	44
6. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 1 ^ª Cultivo.....	49
7. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 1 ^ª Cultivo.....	53
8. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 1 ^ª Cultivo.....	55
9. Relações entre os períodos de incubação dos fosfatos com o solo e o fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja, do primeiro cultivo.....	56

10. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e granulometrias. 1 ^ª Cultivo.....	58
11. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2 ^ª Cultivo..	60
12. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2 ^ª Cultivo.	61
13. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2 ^ª Cultivo.....	62
14. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3 ^ª Cultivo.....	64
15. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3 ^ª Cultivo.....	65
16. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3 ^ª Cultivo.....	66
17. Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de soja em função fontes de fósforo e granulometrias. Dados acumulados de três cultivos.....	68
18. índice de eficiência agronômica do parâmetro produção acumulada de matéria seca da parte aérea de plantas de soja em função das fontes de fósforo e granulometrias.....	69

19.	Fósforo absorvido pela parte aérea de plantas de soja em função de fontes e granulometrias dos fosfatos Dados acumulados dos três cultivos.	72
20.	índice de eficiência agrônômica do parâmetro fósforo absorvido e acumulado pela parte aérea de plantas de soja em função de fontes e granulometrias dos fosfatos.	73
21.	Fósforo do solo extraído pela solução H_2SO_4 0,05 N em 4 épocas de amostragens durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de pó.	75
22.	Fósforo do solo extraído pela solução H_2SO_4 0,05 N em 4 épocas de amostragens durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de grânulos.	76
23.	Fósforo do solo extraído pelo método de resina em 4 épocas de amostragem durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de pó.	79
24.	Fósforo do solo extraído pelo método de resina em 4 épocas de amostragem durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de grânulo.	80
25.	Produtividade de grãos de soja, concentração de fósforo nas folhas e fósforo disponível no solo extraído pelo H_2SO_4 0,05 N em função da aplicação de fósforo solúvel nas formas de pó e grânulo. Efeito médio das doses de P aplicadas a lanço e no sulco.	84
26.	Concentração de fósforo nas folhas de soja em função de aplicação de fósforo a lanço e no sulco.	85

27. Produtividade de grãos de soja em função da aplicação de fósforo a lance e no sulco.....	86
28. Relações entre a produtividade de grãos de soja e o fósforo aplicado isoladamente a lance e no sulco, e concentração de fósforo nas folhas dos mesmos tratamentos.	95

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Efeito dos períodos de incubação dos fosfatos com o solo, sobre o fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja do primeiro cultivo.	57
2. Fósforo recuperado do solo em dois extratores, após aplicação de superfosfato triplo exclusivamente a lanço (a) ou no sulco (b)... ..	81
3. Produtividade de soja. - Superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo a lanço na forma de pó e granulada, e da aplicação no sulco.....	88
4. Resposta da soja à aplicação de fósforo no sulco associada à aplicação a lanço (média das granulometrias). (a) Produtividade de grãos e (b) Teor de fósforo nas folhas.....	90
5. Resposta da soja à aplicação de fósforo no sulco associada à aplicação a lanço na forma de grânulo. (a) Produtividade de grãos e (b) Concentração de fósforo nas folhas.....	91
6. Produtividade de soja em função da aplicação isolada de fósforo a lanço e no sulco (a), e em função da concentração de fósforo nas folhas, oriundas dos mesmos tratamentos.....	94
7. Curva de resposta da produtividade de soja ao teor de fósforo extraível em H_2SO_4 0,05 N, oriundo da aplicação exclusivamente de fósforo no sulco. Amostragem do solo efetuada no sulco.....	97
8. Curva de resposta da produtividade de soja em função do fósforo extraível pelos métodos de H_2SO_4 0,05 N e da resina, oriundo da aplicação de fósforo a lanço no solo.....	98

LISTA DE APÊNDICES

	Página
1. Valores de F da análise de variância dos parâmetros, produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja, concentração de fósforo e fósforo absorvido, em função dos cultivos.	115
2. Valores de F da análise de variância dos parâmetros, produção acumulada de matéria seca, fósforo absorvido e acumulado e seus respectivos índices de Eficiência Agronômica..	116
3. Resumo da análise de variância dos parâmetros, produção de grãos, concentração de fósforo nas folhas, e fósforo disponível no solo pelo método de H_2SO_4 - 0,05 N.....	117
4. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo (média de granulado e pó) e da aplicação no sulco.....	118
5. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo pó a lanço e da aplicação na forma granulada no sulco.....	119
6. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo granulado a lanço e no sulco.....	120
7. Produtividade de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo pó a lanço e da aplicação na forma granulada no sulco.....	121
8. Produtividade de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo granulado a lanço e no sulco.....	122

EFEITO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO E DO PERÍODO DE INCUBAÇÃO NA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DOS FOSFATOS

Autor: Roberto Tetsuo Tanaka

Orientador: Dr Takashi Muraoka

RESUMO

Devido às características físico-químicas dos solos brasileiros, como baixa disponibilidade e alta capacidade de adsorção de fósforo, é grande a demanda por adubos fosfatados, que aliada à baixa taxa de aproveitamento do fósforo pelas culturas a partir dos fosfatos industrializados, torna oneroso o seu uso. Para avaliar o comportamento de cinco fontes de fósforo (superfosfato triplo, termofosfato sílico-magnésiano, fosfato bicálcico, fosfato patos de minas parcialmente acidulado em ácido sulfúrico e fosfato natural patos de minas), duas granulometrias (pó ou grânulo) e quatro períodos de incubação (1, 25, 81 e 169 dias), foi conduzido um experimento em casa de vegetação com vasos contendo 2,8 kg do solo Latossolo Vermelho Escuro Álico A moderado textura muito argilosa fase cerrado tropical subcaducifólio relevo plano, cultivando-se plantas de soja até os 55 dias,

por três ciclos consecutivos. No mesmo solo de cerrado recém desmatado (primeiro cultivo), em Uberlândia, MG, previamente corrigido com calcário dolomítico, foi estudado o modo de aplicação de fósforo (lanço ou sulco), a granulometria (pó ou grânulo na aplicação a lanço) e doses de fósforo usando como fonte o superfosfato triplo e cultivando-se a soja no ano agrícola de 1986/87 como planta teste.

O ensaio realizado em casa de vegetação permitiu extrair as seguintes considerações:

- Após a incubação dos fosfatos, superfosfato triplo, termofosfato sílico-magnésiano, parcialmente acidulado, bicálcico e natural de patos, nas formas de pó ou grânulo, com um solo de cerrado durante, 1, 25, 81 e 169 dias, a análise do solo revelou diferenças quanto ao teor de fósforo extraível, mas não quanto às demais características químicas determinadas.

- A granulação dos fosfatos solúveis em citrato de amônio mais água e incubados por períodos mais longos proporcionou maiores teores de fósforo extraível pelos métodos de H_2SO_4 0,05 N e resina trocadora de íons, enquanto a incubação por apenas um dia dos fosfatos na forma de pó foi suficiente para proporcionar valores máximos de extração de fósforo.

- Para cada fosfato, a capacidade de extração de fósforo pelo método da resina acompanhou diretamente a sua solubilidade em citrato de amônio mais água; a mesma tendência não foi observada pelo método do ácido sulfúrico.

- Os fosfatos, superfosfato triplo, termofosfato sílico-magnésiano, parcialmente acidulado e bicálcico que apresentaram considerável fração de fósforo solúvel em

citrato de amônio mais água foram equivalentes agronomicamente no primeiro cultivo, quando avaliados pela produção de matéria seca da parte aérea de plantas de soja e pela absorção de fósforo pelo mesmo material.

- Os fosfatos de maior solubilidade em água, como o superfosfato triplo e o parcialmente acidulado tiveram diminuída a sua eficiência agrônômica com o maior período de incubação. Ao contrário, os fosfatos de baixa solubilidade em água mas solúveis em citrato de amônio como o termofosfato, apresentaram uma melhor eficiência agrônômica com a incubação por 169 dias do que por um dia.

- Através da análise dos dados dos três cultivos de soja, tanto individualmente quanto acumulados, verificou-se que houve a seguinte ordem decrescente na eficiência agrônômica dos fosfatos: bicálcico > superfosfato triplo > termofosfato > parcialmente acidulado > natural de patos = testemunha sem fósforo. Esta sequência também esteve relacionada à percentagem da fração solúvel em citrato de amônio mais água com a fração total de fósforo de cada fosfato.

- A granulação do superfosfato triplo, do termofosfato e o do fosfato bicálcico aumentou sistematicamente a eficiência agrônômica destes fertilizantes, enquanto que para o fosfato natural de patos, essa técnica não trouxe vantagens.

Os ensaios realizados no campo permitiram extrair as seguintes considerações:

- Não houve variação consistente nos teores de fósforo do solo extraível tanto pelo H_2SO_4 0,05 N quanto pela resina trocadora de íons. Estes dois métodos de extração de fósforo também não discriminaram

quantitativamente o superfosfato triplo aplicado na forma de pó da forma granular.

- O aproveitamento ou recuperação pela cultura da soja do fósforo aplicado no sulco foi maior em relação ao aplicado a lanço, quando se consideraram as doses equivalentes.

- Com as doses crescentes de fósforo aplicadas a lanço, houve redução no efeito daquele aplicado no sulco da semeadura, avaliada pela produtividade de grãos e teor de fósforo nas folhas de soja.

EFFECT OF APPLICATION METHOD AND
INCUBATION PERIOD OF AGRONOMIC EFFICIENCY
OF PHOSPHATES

_Author: Roberto Tetsuo Tanaka

Adviser: Takashi Muraoka

SUMMARY

Due to physical and chemical characteristics of the Brazilian soils, the demand for P fertilizers is high, which associated with the low recovery by crops from industrialized phosphates, make expensive its use. To evaluate the behavior of five P sources (triple superphosphate, heat-treated phosphate, partially acidulated patos de minas rock phosphate, dicalcium phosphate and patos de minas rock phosphate), two granulations (powder or granular) and four periods of incubation (1, 25, 81 and 169 days), an experiment was carried out under greenhouse conditions in pots containing 2.8 kg of a limed "cerrado" soil (Typic Acrustox). Soybeans were cropped for three consecutive cycles of 55 days each. A field experiment was also carried out in the county of Uberlandia, MG, Brazil, on the same Typic Acrustox previously limed, in order to evaluate two modes of P application (row and broadcast), two granulations (powder and granular), and four P levels. P source was triple superphosphate and soybeans cv Doko were used as test plant during the 1986/1987 growing season.

The data of the glasshouse experiment permitted the following conclusions:

- Soil analysis indicated variation on P content after incubation of the tested phosphates either as powder or granules. The other measured soil characteristics did not change

- The granulation of ammonium citrate plus water soluble phosphates incubated for larger periods, showed higher values of soil phosphorus extracted either by H_2SO_4 0,05 N or ion exchange resin. One day of incubation in the powder form of any phosphate gave the highest values of extractable P.

- There was a close relationship between resin extractable phosphorus and the ammonium citrate plus water phosphorus solubility of each phosphate. The same trend was not observed for H_2SO_4 0,05 N extraction.

- Except for patos de minas rock phosphate, all the other phosphates with high phosphorus solubility in ammonium citrate plus water were equivalent when measured by soybean dry matter production or P absorbed in the first crop.

- Phosphates with higher phosphorus solubility in water, such as triple superphosphate and partially acidulated phosphate, had a sharp reduction on agronomic efficiency as the incubation period was extended. On the other hand, phosphates with low solubility in water but in ammonium citrate soluble showed an inverse trend.

- The following sequence of decreasing agronomic efficiency was observed: dicalcium phosphate $\geq$ triple superphosphate $>$ heat-treated phosphate $>$ partially acidulated rock phosphate $>$ rock phosphate = control, which was related to the ammonium citrate plus water soluble fraction and total P content of each phosphate.

- Granulation of triple superphosphate, heat-treated phosphate and dicalcium phosphate increased its agronomic efficiency whereas for the rock phosphate there was not advantage of this process.

From the data field experiment the following conclusions can be reached:

- There was not a consistent variation of available soil phosphorus extracted both by H_2SO_4 0,05 N or ion exchange resin. These methods did not discriminate quantitatively the phosphorus applied in granular or powder form.

- Row application of phosphorus provided better P recovery by soybeans than broadcasting, when equivalent dosis were compared.

- Increasing the amount of broadcasted phosphorus caused a decrease in the effect of row applied phosphorus as measured by soybean grain production or leaf phosphorus content.

1. INTRODUÇÃO

Segundo BONATO & BONATO (1987), as primeiras referências encontradas na literatura sobre a soja [Glycine max (L.) Merrill] no Brasil foram de D'utra em 1882 na Bahia, de Daffert em 1892 em São Paulo e de Minsen em 1901 no Rio Grande do Sul. Os dados da soja brasileira foram apresentados pela primeira vez nas estatísticas oficiais somente nos anos de: 1941 (RS), 1945 (SP) e 1949 (mundial).

A produção comercial de soja no Brasil iniciou-se na década de 40, entretanto, a grande expansão verificou-se após 1973, quando os preços internacionais do produto alcançaram as mais altas cotações da história (EMBRAPA, 1988). De acordo com essa fonte, a área cultivada com a soja passou de 0,8 milhões de ha, em 1966/70, para 9,0 milhões, em 1987; enquanto a produção passou de 0,9 para cerca de 16,5 milhões de toneladas. O uso de novas tecnologias para a produção de soja proporcionou um incremento na produtividade de 1.118 para 1.833 kg/ha nesse período. No contexto mundial, o Brasil é o segundo maior produtor desde 1975, sendo que sua participação atual sobre o volume total é de aproximadamente 17%. Devido à grande produção, os excedentes nominados como complexo soja, têm sido um dos principais itens nas pautas das exportações

brasileiras, alcançando valores médios anuais de aproximadamente 3,2 bilhões de dólares.

O fósforo (P) é um dos dezesseis elementos essenciais às plantas. Apesar das pequenas quantidades de P extraídas e exportadas pela soja (BATAGLIA & MASCARENHAS, 1977 e CORDEIRO et alii, 1979a), devida à baixa taxa de recuperação pelas plantas, sua adubação necessita geralmente de doses elevadas, principalmente em solos recém-desmatados do cerrado ou em solos de pouco cultivo. Aliado a essas características, o aumento substancial do preço do fertilizante fosfatado nas últimas décadas o faz, dentre os adubos usados na cultura da soja, o mais oneroso. Outro fator a considerar, é o uso dos adubos fosfatados altamente industrializados, que exigem no seu processo de fabricação, rochas de maior pureza e enxofre importado para acidular a apatita. O adubo convencional assim obtido, apresenta alta solubilidade, no entanto, devido às características físico-químicas dos solos tropicais altamente intemperizados, o seu aproveitamento pelas plantas é geralmente baixo, desde cerca de 5% no primeiro cultivo a 50% após vários cultivos.

Fatores como alto custo do fertilizante fosfatado e seu baixo aproveitamento pelas plantas provocaram, desde o início dos anos 70, concentração de esforços da pesquisa agrícola, no sentido de serem avaliadas fontes alternativas de P. Essas fontes incluem fosfatos insolúveis em água.

A eficiência agronômica de fosfatos depende muito de sua solubilidade em água e de sua reação com o solo. Enquanto que, para fosfatos solúveis em água, deve-se limitar o contacto com o solo, para diminuir as reações que reduzem a disponibilidade, no caso de fosfatos insolúveis em água, ao contrário, o contacto íntimo do adubo com o solo é essencial para favorecer a sua dissolução.

O presente estudo tem os seguintes objetivos:

- a) Avaliar o efeito da granulação e do período de incubação de diferentes fosfatos, na sua eficiência agronômica;
- b) Verificar o efeito da granulação do superfosfato triplo aplicado em diversas doses a lanço, combinado com a aplicação no sulco do superfosfato granulado, na eficiência agronômica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fósforo no solo

Como a maior parte dos solos de regiões tropicais úmidas, os solos brasileiros sofreram na sua formação um forte intemperismo (lixiviação de bases e sais, formação de óxidos de alumínio e ferro e formação do mineral de argila do tipo 1:1) e, como consequência, caracterizam-se pelo baixo teor de bases, pela acidez elevada, pela baixa disponibilidade de P para as plantas, e pela alta capacidade de fixação desse nutriente. Atribui-se a essas duas últimas características as frequentes e intensas respostas das culturas à adubação fosfatada e às exigências de altas doses na aplicação de fósforo no solo. Para solos de cerrado, FREIRE et alii (1979) estimaram a necessidade de 141 kg/ha de P_2O_5 para solos arenosos a 730 kg/ha de P_2O_5 para solos argilosos, para obtenção de produção máxima de soja e do nível crítico de P no solo, quando aplicados a lanço na forma solúvel.

Apesar dessa baixa disponibilidade de P, os teores totais presentes no solo são relativamente altos, da ordem de 100 a 2000 ppm, a quase totalidade fazendo parte dos compostos sólidos orgânicos e inorgânicos de baixa

solubilidade (P-sólido), restando teores muito baixos, em geral menos de 0,1 ppm, dissolvidos em solução (P-solução), conforme relatam VOLKWEISS e RAIJ (1977). Uma parte do P-sólido mantém um certo equilíbrio mais ou menos rápido com o P-solução e é chamado P-lábil. Devido à essa característica de baixa concentração de P na solução, ela necessita ser restabelecida constantemente para suprir satisfatoriamente as culturas. A resistência que o solo oferece à alteração na concentração de P na solução denomina-se capacidade tampão, que é função da relação entre os fatores quantidade ou P-lábil e intensidade ou P-solução. De uma forma geral, há necessidade de consideráveis teores de P-lábil, principalmente em solos argilosos, para manter uma atividade de P adequada em solução.

Quando um fosfato solúvel em água é aplicado no solo, ocorre dissolução de P e posterior adsorção à fase sólida e somente uma pequena fração do P adicionado pode ser extraído com soluções diluídas de ácidos ou de sais. Essa passagem do P-solução a P-sólido no solo é conhecida como retenção de P ou "fixação".

Na fertilidade do solo, o fósforo pode, conceitualmente, ser separado em: fósforo na solução, fósforo-lábil e fósforo-não-lábil. Ao adicionar ao solo uma fonte de fósforo solúvel em água ou citrato de amônio, há uma rápida elevação da atividade de fósforo na solução e posterior queda, de menor intensidade, pela transformação a

fósforo-lábil e este, a seguir, passa a fósforo-não-lábil, praticamente indisponível às plantas devido à sua estabilidade. Existe um equilíbrio dinâmico entre o fósforo na solução e o lábil, assim como, entre o lábil e o não lábil. Devido às características químicas do solo, a reação tenderá para a formação de fósforo-não-lábil, até a saturação da capacidade de retenção.

A retenção de P- pelos solos é atribuída aos compostos de Al e Fe e ao Al e Fe trocáveis ou presentes na solução do solo (KAMPRATH, 1977; VOLKWEISS & RAIJ, 1977). Trata-se de uma adsorção por troca de ligantes, na qual a hidroxila da superfície do óxido é substituída pelo fosfato. Por ser uma reação química com formação de ligações covalentes, o processo não é facilmente reversível.

A retenção na forma de adsorção ocorre sobre as superfícies de óxidos hidratados de Al e Fe, conforme o esquema abaixo:

ou

onde o M corresponde ao Al ou Fe da superfície da argila ou sexquióxidos (VOLKWEISS & RAIJ, 1977). Do esquema, comprova-se que a elevação do índice pH desloca a equação para a esquerda e assim aumenta a concentração de P na solução do solo, ou ainda reduz a retenção do P oriundo do fertilizante mais solúvel.

Já a retenção na forma de precipitação, é verificada pela alta afinidade dos íons fosfato com os íons Al e Fe presentes na solução do solo, os quais estão em equilíbrio com as formas trocáveis (KAMPRATH, 1977). A acidez em volta de grânulos de superfosfato, liberada pela reação do adubo com a água, aumenta a solubilidade dos cátions Al, Fe e Mn e, à medida que a solução é diluída, o fosfato reage com esses elementos para formar fosfatos precipitados.

2.2. Fatores da solubilização do fosfato no solo

O principal mineral que contém o fósforo na natureza é a apatita, que é considerada como a matéria prima mais importante na fabricação dos adubos fosfatados. Segundo HAMMOND et alii (1986) a fórmula empírica da apatita patos de minas é a seguinte:

A rocha fosfática nacional diferencia-se da estrangeira pela origem ígnea ao invés de sedimentar, pelo

mineral de fosfato ser apatita cristalina ao invés de oólitos fosfáticos e pelo baixo teor de P_2O_5 no minério (5-15%) contra os 20-32%.

Segundo KHASAWNEH & DOLL (1978), a composição das rochas apatíticas variam enormemente, dependendo das substituições isomórficas entre os diversos cátions e/ou entre os diferentes ânions, apresentadas dentro da sua estrutura. Essas substituições podem determinar o comportamento químico das apatitas. Assim, CHIEN (1977) verificou que o fosfato de Carolina do Norte apresentou maior solubilidade em acetato de amônio 1N pH 4,8 do que os fosfatos de Flórida e Tennessee, o que foi atribuído à maior substituição isomórfica do fosfato pelo carbonato. Em revisão de literatura, HAMMOND et alii (1986) citaram que o grau desta substituição na estrutura da apatita como sendo o fator determinante da reatividade química das rochas fosfatadas. A taxa da substituição isomórfica e os íons envolvidos podem afetar também o processo industrial na fabricação do adubo fosfatado, pois as impurezas como o Al e o Fe dificultam a produção ou oneram o seu custo (GUARDANI & VALARELLI, 1984).

Uma das condições essenciais para a viabilidade do uso agronômico de um fosfato natural, é a sua reatividade química representada pela maior solubilidade. Satisfeita esta condição, a eficiência agronômica da apatita pode ser aumentada diminuindo-se o tamanho das partículas através da moagem. BARNES & KAMPRATH

(1975) após aplicarem os fosfatos de Carolina do Norte e da Flórida ao solo, observaram maior recuperação do P-extraível pelo método Bray 1 e maior produção de matéria seca vegetal e fósforo absorvido, quando aplicados em partículas menores.

A dissolução das apatitas também depende dos produtos das reações. HAMMOND et alii (1986) descreveram esta dependência usando a reação da dissolução da fluorapatita como exemplo:

Analisando esta reação, os autores relataram que os baixos valores de pH, Ca trocável e P-solução favoreceram a dissolução do fosfato, e que estas condições são encontradas em muitos solos tropicais. A retenção do P-solução pelo solo ou a absorção pelas plantas também favorecem a dissolução. Experimentalmente BARNES & KAMPRATH (1975) comprovaram que a acidez do solo proporcionou maior aproveitamento de dois fosfatos naturais pelo milho e soja.

2.3. Fósforo na planta

Na planta, o P está relacionado principalmente nos processos biológicos que envolvem energia. O fósforo é absorvido pelas plantas nas formas iônicas de ortofosfato H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , com predominância do primeiro. A relação entre essas duas espécies iônicas na

solução do solo é dependente de pH. Em solos ácidos há predominância do íon primário $H_2PO_4^-$.

A exigência de P pela cultura de soja é de cerca de 12,9 kg/ha (BATAGLIA et alii, 1976). Cerca de 5,1 kg/ha de P são exportados em 1,0 tonelada de grãos de soja (BATAGLIA et alii, 1976 e MASCARENHAS et alii, 1980), que correspondem à aproximadamente 85% da exigência da cultura.

No Brasil, não há dados de pesquisa para a interpretação dos teores de P nas folhas de soja. Dessa forma, utiliza-se da classificação norte-americana conforme apresentada por TRANI et alii (1983) que consideram o teor de 0,25% de P nas terceiras folhas com pecíolos coletadas no florescimento, como nível crítico.

2.4. Respostas a fontes de fosfato

O número de pesquisas de avaliação agronômica de fontes de P aumentou consideravelmente após a descoberta de diversas jazidas no Brasil Central e, coincidentemente, com a implantação do Programa POLOCENTRO, que visou o aproveitamento agropecuário da região do Cerrado.

Devido à grande demanda de P pelas novas fronteiras agrícolas representadas pelos solos de cerrado, em função da extensão e da dose exigida e também pela localização das jazidas, os primeiros ensaios visaram estudar o efeito da aplicação dos fosfatos naturais simplesmente moidos.

GARGANTINI & SANTOS (1971) e GOEDERT & LOBATO (1984), com base em ensaios de vasos, relataram a superioridade do termofosfato na produção de grãos de soja e de matéria seca de culturas, quando comparado a outras fontes de P.

Ao contrário da fonte solúvel, doses crescentes do fosfato natural de patos de minas não proporcionaram rendimentos crescentes de matéria seca e P absorvido, quando testados em solos LR do cerrado com baixo teor de P disponível (TANAKA, 1978). Avaliando o mesmo fosfato, CORDEIRO et alii (1979b) observaram, para soja, uma eficiência de 62% em relação ao superfosfato triplo (ST) no efeito residual. Com a aplicação de 70 kg/ha de $P_{25}O_{10}$ na forma solúvel, essa eficiência passou para 83%.

BRAGA et alii (1980), testando os fosfatos de patos, araxá e catalão em experimento conduzido em Orlândia e TANAKA et alii (1984a), avaliando os fosfatos patos de minas, araxá e tapira, no município de Uberaba, concluíram pela ineficiência daquelas fontes de P para suprir satisfatoriamente a cultura de soja. Também no efeito residual por cinco cultivos, verificou-se que os fosfatos naturais proporcionaram rendimentos de grãos de soja estatisticamente inferiores aquele proporcionado pelo termofosfato yoorin, utilizado como fonte de referência (TANAKA et alii, 1984a).

Num solo LA de cerrado, SMYTH & SANCHEZ (1982) avaliaram o fosfato natural patos de minas. O solo

apresentava alta capacidade de adsorção de P, sendo necessária a aplicação de 400 ppm de P para alcançar 0,2 ppm na solução do solo. O fosfato natural foi nitidamente inferior à fonte solúvel, mas a sua eficiência relativa aumentou no segundo cultivo da soja. A aplicação de 352 kg/ha de P proporcionou 46 a 53% da produção máxima em relação ao superfosfato simples, respectivamente no primeiro e segundo cultivo. A melhoria na eficiência do segundo cultivo foi atribuída ao decréscimo da eficiência da fonte solúvel, devido à maior exportação de P no primeiro cultivo. Os autores estimaram que os efeitos propiciados por 4 kg de P/ha como fosfato natural são semelhantes àquele proporcionado por 1 kg/ha de P da fonte solúvel.

GOEDERT & LOBATO (1984) compararam os efeitos de onze fontes de P, utilizando diversas culturas em cultivos sucessivos. Após cinco anos agrícolas de culturas anuais, o índice de eficiência agronômica máximo alcançado pelos fosfatos naturais foi de 56%, enquanto nos três cultivos finais com o andropogon, esse índice foi melhorado para 70%. Concluíram também que a menor eficiência dos fosfatos naturais de araxá, abaeté, catalão e patos de minas não foi compensada com a sucessão de cultivos, ou seja, o efeito residual não foi superior ao da fonte solúvel, o superfosfato triplo.

Os constantes dados da baixa eficiência agronômica dos fosfatos naturais brasileiros,

principalmente para as culturas de rápido crescimento, já previsíveis pela análise mineralógica (substituição isomórfica do carbonato por fosfato), tem levado a preferência por tratamentos dos mesmos para melhorar a eficiência. O objetivo inicial dos tratamentos visava obter fosfato de baixo custo, de alta eficiência agronômica, com o uso de menor quantidade possível de insumos importados. Segundo GUARDANI & VALARELLI (1984), a produção de fosfatos parcialmente acidulados é considerada como uma alternativa relativamente simples que possibilita a utilização de matérias primas menos nobres com elevado teor de impurezas, o que não seria possível na fabricação de fosfatos solúveis convencionais.

Tendo o sorgo como planta indicadora, FREIRE et alii (1983) verificaram que os fosfatos araxá concentrado e o natural apresentaram eficiências inferiores, enquanto o parcialmente acidulado apresentava uma eficiência intermediária entre o natural e o solúvel. Segundo FERNANDES & KAMINSKI (1987), as relações de acidulação do fosfato de araxá não afetaram o P absorvido pela sucessão sorgo-soja-aveia, em experimento baseando em aplicações idênticas do P-solúvel em citrato de amônio mais água e não de P-total, prática mais comum. Os autores concluíram que somente a fração acidulada contribuiu para suprir as plantas de P, ao contrário dos dados da literatura, que consideram o P-total como fonte supridora. Também TREMAIN et alii (1987) observaram que o Lupinus

angustifolius somente absorveu P da fração solúvel de um fosfato parcialmente acidulado. Outrossim, FRIESEN et alii (1987) verificaram que o principal fator que afetou a resposta da alfafa à aplicação do fosfato parcialmente acidulado foi o grau de acidulação, sendo bem correlacionado com o teor relativo de P na forma solúvel em água mais citrato, concordando com os dados de FERNANDES & KAMINSKI (1987).

Um fator importante a considerar numa avaliação de fertilizantes é o efeito da presença de outros nutrientes, geralmente deficientes em solos brasileiros, ou o seu efeito como corretivo da acidez e da toxidez de elementos. MELLO et alii (1981) estudaram o efeito de fosfatos sobre a acidez de solo hidromórfico e verificaram que somente o termofosfato aumentou o pH, enquanto o fosfato monoamônico e o ST não alteraram a acidez. De acordo com OSINAME & SOBULO (1985), após quatro semanas de incubação, as fontes de P aumentaram o pH do solo com as crescentes doses de aplicações. O maior acréscimo foi provocado pela escória de Thomas (pH 4,3 a 6,7), seguidos de superfosfato (pH 4,3 a 5,4) e de fosfato natural (pH 4,3 a 4,7), sendo que os índices máximos de cada fonte foram alcançados com a aplicação de 200 ppm de P. BATAGLIA et alii (1984) estudaram os efeitos dos fosfatos sobre a produtividade de soja e absorção de nutrientes, durante três cultivos. Na ausência do calcário, os adubos fosfatados menos solúveis, portanto aplicados em maiores

doses e incorporando grande quantidade de Ca, proporcionaram melhores efeitos residuais que os fosfatos solúveis. A absorção de Ca, Mg, P e a relação Ca/Mn das folhas tiveram boa correlação com a produtividade de grãos alcançada pelos fosfatos menos solúveis, no terceiro cultivo.

RAIJ (1986) determinou a eficiência agronômica mínima para que os fosfatos alternativos possam competir economicamente com o superfosfato. O autor concluiu que, no caso do emprego do fosfato que proporcione produtividades inferiores ao solúvel, o valor do abaixamento de produção não pode superar a eventual economia da diferença de custos dos dois insumos, e que para relações de preços de P_2O_5 de 50% e 80% em relação ao P_2O_5 do superfosfato, os valores mínimos do índice e eficiência agronômica situam-se em geral respectivamente acima de 80 e 90%. O estudo não levou em consideração o efeito residual, que poderia diminuir a exigência de eficiência, caso o fosfato natural apresentasse maior efeito com o suceder dos cultivos.

2.5. Respostas ao tempo de contato entre o fosfato e o solo

Segundo Larsen, citado por VOLKWEISS & RAIJ (1977), a quantidade de P-lábil no solo oriunda da

dissolução do fosfato natural é diferente daquela oriunda da dissolução do fosfato solúvel, com o tempo, pois nesse último a quantidade de P-lábil é máxima logo após o contato com o solo, decrescendo posteriormente de forma acentuada, enquanto o P-lábil no solo que recebeu aplicação de fosfato de rocha é crescente e lenta com o tempo, para depois decrescer também.

Baseando-se nessa teoria é que são efetuados os estudos sobre o efeito residual e tempo de incubação dos fosfatos.

Em oito solos do estado do Paraná, LOURENÇO (1971) verificou que a adsorção de P já era alta com 5 a 10 minutos de reação, atingindo um estado de quase equilíbrio após 24 horas. Também observou que a recuperação de P pelos extratores químicos é baixa em relação ao total adsorvido. Resultados semelhantes foram alcançados por REZENDE (1974), que estudou o efeito da fixação de P em seis solos nordestinos. Dos 2.000 ppm de P aplicados, 80 a 90% já estavam retidos com 24 horas de contato com os solos. A dissolução do fosfato natural de Sechura foi verificada em 30 solos, do Brasil, Colômbia, Austrália e Nigéria por HUGHES & GILKES (1986), que observaram uma rápida dissolução dentro de um dia e, a seguir, uma baixa dissolução até os 124 dias de estudo. Após 31 dias de incubação, observaram nas doses aplicadas de 0,34 e 34 mg/g de solo, as dissoluções respectivamente entre 0-100% e 0-21%, o que possibilitou concluir que, à medida que se

aumentou a dose, a taxa de dissolução diminuiu. Essa tendência é de se esperar pela contribuição negativa do Ca^{+2} e do H_2PO_4^- , à medida da ocorrência da dissolução.

CHIEN et alii (1980) relataram a ocorrência da diminuição de P-solúvel em água com o tempo, após a aplicação de fosfatos naturais da Carolina do Norte, Flórida e Tennessee, em três solos. O tempo necessário para alcançar o equilíbrio após a aplicação de 1.600 ppm de P variou muito com as fontes de P e tipos de solo. Plotando-se os dados da dissolução de P do fosfato de Sechura em função do tempo (dias), MACKAY et alii (1986) constataram que as formas das curvas obtidas de diversos solos foram semelhantes entre si, mas houve diferenças nas quantidades dissolvidas entre os solos influenciadas pelas propriedades destes últimos. O superfosfato simples incubado em seis solos proporcionou decréscimo de P extraído em água e extrator de Olsen, com o tempo de incubação que durou até 90 dias (SYERS & MACKAY, 1986). Por outro lado, o fosfato natural de Sechura aumentou o teor de P-solúvel em extratores de Bray e Olsen.

Quando o fósforo foi aplicado ao solo na forma solúvel em água, BOLLAND & BOWDEN (1982) observaram que a recuperação de P extraído pela solução de bicarbonato decreceu ao longo de sete anos, enquanto, a aplicação de fosfato calcinado a 500 e 900°C, proporcionou acréscimos de P-extraível pelo mesmo método no mesmo período. BARBOSA FILHO (1986) verificou que o fosfato solúvel em água

incubado com o solo até 180 dias, proporcionou decréscimos nos teores de P extraível pelos métodos de Olsen + EDTA, Bray-1 e resina. Estudo realizado por FEITOSA (1978) em casa de vegetação com dois tipos de solos e com os fosfatos, ST, termofosfato, hiperfosfato e apatita de araxá, permitiu concluir que a incubação dos mesmos por 10, 30, e 120 dias proporcionou pouca variação nos teores de P. Segundo BARBOSA FILHO et alii (1987), as transformações de fosfatos solúvel e insolúvel aplicados no solo ocorreram dentro dos primeiros 45 dias após a incubação, não ocorrendo variações depois desse período até 120 dias.

O efeito do tempo de incubação do fosfato araxá em dez tipos de solos sobre o P disponível foi estudado por NOVAIS et alii (1980), tendo o sorgo como planta indicadora. Em relação ao tempo zero de incubação, a produção de matéria seca, a concentração de P na parte aérea e a absorção de P diminuíram consistentemente com o tempo de incubação. Os tratamentos que ficaram incubados por 253 dias proporcionaram somente 79,9% de matéria seca, 77,0% de concentração de P na parte aérea e 60,6% de absorção de P. Essa queda de eficiência do fosfato em função do tempo de incubação foi atribuída à reação do fosfato solubilizado com o solo, formando compostos de menor disponibilidade, ou seja, a quantidade acumulada de P solubilizado cresceu com o tempo, mas as reações com o solo não permitiram manter o P-lábil em nível satisfatório para suprir as plantas. MOREIRA (1988), trabalhando com mudas de

eucalipto, chegou a uma conclusão semelhante. O tempo de contato entre o P-solúvel aplicado e o solo proporcionou decréscimo significativo no teor de P recuperado pelos extratores Mehlich 1, Bray-1, resina e CaCl_2 0,01M; e a maior taxa de decréscimo foi verificada nos primeiros 15 a 30 dias (GONÇALVES, 1988 e MOREIRA, 1988).

A solubilidade da apatita araxá, medida pelo aumento do Ca trocável do solo; fracionamento e extração de P, cresceu em termos cumulativos, com o tempo de incubação estudado até 270 dias (NOVELINO et alii, 1985). Apesar desta maior solubilização da apatita com o tempo de incubação, as plantas de sorgo responderam negativamente, comprovado também por NOVAIS et alii (1980), GONÇALVES (1988) e MOREIRA (1988). Por outro lado, ANDERSON et alii (1985) chegaram a conclusão oposta, pois no estudo de incubação de sete fosfatos naturais aplicados na dose de 500 mg P/kg de solo, observaram uma absorção de P de forma linear e positiva com o tempo de cultivo.

Quinze amostras de solos de cerrado foram incubadas com fosfato de araxá na dose de 87 ug/g de solo. O estudo de COUTO et alii (1987) revelou que o P extraído pelo método Mehlich-1 decresceu acentuadamente com o tempo de incubação (5 a 300 dias), dificultando, segundo os autores, a estimativa da solubilização da apatita. Por outro lado, o teor de P extraído pelo método Bray-1 foi considerado adequado, não havendo, aparentemente, variações com o tempo de incubação. Boa estimativa da solubilização

foi obtida analisando-se o Ca trocável, que cresceu com o tempo de incubação.

As diversas interpretações dadas aos resultados obtidos em muitos trabalhos devem-se em grande parte à pouca ênfase dada às reações secundárias que ocorrem durante e após a solubilização de fosfatos, tanto os solúveis como os de baixa solubilidade.

2.6. Métodos de aplicação e granulometria

Além da boa qualidade química e física desejável de um adubo fosfatado, alterações físicas do próprio adubo e métodos de aplicação podem melhorar acentuadamente a eficiência agrônômica, reduzindo dessa forma a parte retida pelo solo.

MAGALHÃES (1974) verificou em quatro solos de cerrado que a localização do P aplicado é mais vantajosa na produção de matéria seca de milho, bem como na absorção do nutriente. No solo LE distrófico observou, ainda, que a aplicação de maiores doses (200 ppm de P) diminuiu a vantagem do tratamento que recebeu o P de maneira localizada, devido à tendência para elevar o P-solução em nível adequado em todo o volume do solo acondicionado em vaso. Num experimento onde o sistema radicular de uma planta foi dividido em dois vasos juntos, (MACHADO et alii, 1983) verificaram maior produção de matéria seca e absorção de P, quando a quantidade total de P aplicada foi

incorporada somente num vaso, em relação à incorporação da mesma quantidade em ambos os vasos.

BORKERT & BARBER (1985a) estudaram o efeito da aplicação de 180 mg de P/vaso com 3 kg de solo, o fósforo sendo misturado a 6,25, 12,5, 25, 50 e 100% do volume do solo. Os autores concluíram que houve efeito positivo na localização do adubo sobre o crescimento da soja, sendo o ótimo para a absorção do fósforo entre 6,25 a 12,5% do adubo fosfatado misturado ao solo. Além da vantagem na redução de adsorção do fósforo pelo solo, com essa prática, verificaram um estímulo ao crescimento de raízes. Nessa mesma linha de pesquisa, RAIJ (1979) já havia verificado em misturas de fosfatos com 1, 10, 100 % do volume do solo, que para o superfosfato triplo foi indiferente, o fosfato alvorado uma ligeira melhora e o hiperfosfato proporcionou uma resposta significativa das plantas de milho ao maior volume de solo utilizado na mistura com este adubo.

BORKERT & BARBER (1985b) verificaram no estudo em vasos que à medida que se aumentou a dose de fosfato solúvel aplicado, houve a necessidade de misturá-lo com maior volume do solo para estimar a máxima absorção deste nutriente pelas plantas de soja. Portanto, dependendo da dose a fosfatagem a lanço não seria o melhor método de aplicação para proporcionar a máxima eficiência na absorção.

TANAKA et alii (1988) observaram que o superfosfato triplo aplicado a lanço no primeiro cultivo em

diversas doses apresentou eficiência agrônômica inferior em relação à aplicação no sulco, de um quarto daquelas doses durante quatro cultivos de soja. PEDROSO NETO & TANAKA (1988) mostraram com a aplicação de superfosfato triplo na dose de 220 kg/ha de P_2O_5 em solo de cerrado um rendimento de 2.024 kg/ha de soja, enquanto o tratamento de 120 kg/ha a lanco associado a 100 kg/ha de P_2O_5 proporcionava 1.609 kg/ha de soja evidenciando a superioridade da aplicação da dose total no sulco.

Por outro lado, YOST et alii (1976), em experimento de campo conduzido por diversos anos com o milho, verificaram que a aplicação total a lanco ou o parcelamento desse total, anualmente no sulco, proporcionaram cumulativamente produtividades estatisticamente semelhantes. Em três ensaios dos dez conduzidos nos Estados Unidos, REHM (1986) verificou que a aplicação a lanco de 11, 22, 33 e 44 kg/ha de P, com incorporação antes da semeadura, proporcionou maiores rendimentos de soja e maiores teores de P nas folhas, do que as aplicações no sulco. A textura daqueles solos variaram desde franco siltoso a franco silto-argiloso.

LANA et alii (1985) estudaram o efeito da granulometria do fosfato araxá sobre o teor de P extraído pelo extrator Bray-1 e sobre plantas de sorgo. Observaram maiores teores de P com a redução do tamanho das partículas até a faixa de 150 malhas/polegadas. Para obter o mesmo efeito, na ausência da calagem, o fósforo poderia ser

utilizado em partículas maiores, o que é mais econômico, reduz a fixação de P e aumenta o efeito residual. O efeito do tamanho da partícula do fosfato natural de Carolina do Norte sobre a dissolução no solo foi estudado por KANABO & GILKES (1988), usando quatro frações e duas doses de P. A dissolução, medida pelo Ca trocável do solo, aumentou com o decréscimo do tamanho das partículas e também com o tempo de incubação (1, 7 e 35 dias). A granulação do fosfato de Maldeota diminuiu a eficiência agronômica na seguinte ordem decrescente: sem granulação, granulação com uréia e granulação com nitrato de amônio (CHATTERJEE et alii, 1983). FERREIRA & KAMINSKI (1979) observaram que o fosfato natural em pó ou granulado foi ineficiente para suprir a soja em fósforo.

NOVAES (1983) verificou maior produção de matéria seca de capim gamba quando adubado com fosfato de araxá parcialmente solubilizado, no tamanho de partículas entre 1-2 mm do que no tamanho 2-4 mm. SILVA (1987) não observou diferença entre as três granulometrias do termofosfato estudado sobre a produção de matéria seca de sorgo sacarino. A menor fração (0,25-1,00 mm) do fosfato Carolina do Norte parcialmente acidulado proporcionou em dois dos três solos, maior absorção de P-total por plantas de azevém (STEPHEN, 1985). Estudos efetuados por SUAREZ & IGUE (1974) com dois solos altamente fixadores de P, mostraram que o aumento do diâmetro dos grânulos do superfosfato concentrado proporcionou a maior absorção de P

pelo milho e também o maior efeito residual no segundo cultivo em vasos.

SOUSA & VOLKWEISS (1987a) estudaram a influência de quatro granulometrias do fosfato ST sobre plantas de milho cultivadas em vasos. O fósforo absorvido aumentou com a aplicação de maiores grânulos, enquanto que a produção de matéria seca não foi afetada pela granulometria. A maior parte do P dissolvido dos grânulos do ST reagiu através do mecanismo de precipitação com Al, Fe e Ca (SOUSA & VOLKWEISS, 1987b). Os autores ainda concluíram que cerca de um quarto do P original dos grânulos permaneceu nos seus resíduos, como fosfato dicálcico dihidratado precipitado no local, após onze meses de incubação. O revolvimento dos solos diminuiu o efeito residual do superfosfato granulado, igualando-o ao ST em pó (SOUSA & VOLKWEISS, 1987c).

2.7. Métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo

A maioria dos métodos de avaliação da disponibilidade de P utiliza soluções diluídas de sais, ácidos ou bases, que solubilizam preferencialmente determinado tipo de fosfato e correlacionam diretamente com a resposta biológica, como produção de matéria seca, P absorvido, produtividade agrícola, e os mesmos parâmetros analisados de forma relativa. O melhor método é aquele que

apresenta as mais altas correlações com as respostas biológicas, e adequado aos diversos tipos de solo e resíduo de qualquer fonte de P aplicado.

Segundo COPE & EVANS (1985), a solução extratora de Mehlich ($0,05\text{ N HCl} + 0,025\text{ N H}_2\text{SO}_4$), muito utilizada no Brasil, é um bom extrator para fosfato ligado ao Ca e para solos ácidos de alta intemperização, e relativamente baixa CTC do solo. Devido à sua grande capacidade em dissolver o P-Ca, o autor sugere utilizar esse método com muito cuidado, em solos que receberam fosfatos naturais ou parcialmente acidulados, pois os resultados geralmente são superestimados e consequentemente subestimarão a necessidade de adubação fosfatada.

Ao incorporar uma fonte solúvel de P no solo, SFREDO et alii (1979) e TANAKA et alii (1981) verificaram que não houve variação significativa na eficiência dos extratores químicos, na recuperação de P e nas correlações com as respostas das plantas. Já com a incorporação de fosfato natural, os extratores ácidos superestimaram os teores de P "disponível" e não correlacionaram bem com as respostas das plantas. De acordo com a avaliação de TANAKA et alii (1981), o extrator que estimou melhor a disponibilidade de P oriundo do fosfato natural foi o Bray-2 modificado, enquanto para SFREDO et alii (1979), foram os extratores de Olsen e Bray-1. RAIJ & DIEST (1980) verificaram que a solução de NH_4F solubilizou partículas residuais de P-Al calcinado e o extrator de Mehlich extraiu

P das partículas de apatita, e conseqüentemente as correlações foram pobres em estimar a disponibilidade de P dos fertilizantes para as plantas de soja. As correlações significativas foram observadas com P extraído pela solução de CaCl_2 0,01 M (0,902) e pela resina trocadora de ânions (0,823).

A eficiência do extrator é função também da variável independente. Assim, HOLFORD (1980) avaliou quatro extratores de P do solo, Olsen, Colwell, Bray e Mehlich, em experimento de casa de vegetação em relação à absorção, rendimento relativo, P-lábil e capacidade tampão em 30 solos, cujos valores de pH variaram de 5,4 a 8,1. Os extratores de Olsen e Colwell foram melhor correlacionados com a absorção pela planta, e o Olsen e o Bray, com o rendimento relativo.

RAIJ (1978) apresentou uma revisão de literatura sobre seleção de métodos para avaliar a disponibilidade de P em solos. Conclui que o método da resina trocadora de ânions foi superior devido à maior percentagem da variação (coeficiente de determinação) da resposta a P explicada pela análise e à versatilidade. Em ordem decrescente de eficiência, seguiram os métodos de: Olsen, Bray-1, Mehlich, água, Truog, Bray-2, Egnér, Morgan e CaCl_2 . CABALA & SANTANA (1983) também verificaram a superioridade do método da resina de troca iônica sobre as soluções químicas, quando foram empregadas rochas fosfatadas. Aquele extrator também foi melhor que o de

Mehlich em prever a disponibilidade de P para arroz irrigado de solos de várzeas (GRANDE et alii, 1986). OLIVEIRA (1986) verificou que os extratores químicos funcionaram de maneira eficiente na extração de P do solo LA arenoso, sendo menor no solo LE argiloso, enquanto a resina apresentava boa eficiência em ambos os solos.

RAIJ et alii (1984), analisando conjuntamente os dados de 16 experimentos de milho e 16 de algodão, obtiveram os seguintes coeficientes de correlação: IAC = 0,683; Bray-1 = 0,650; Olsen = 0,391 e resina = 0,803, mostrando naquela época que a resina seria um método promissor de estimar a disponibilidade de P em diversos solos e diversas fontes de P aplicadas. Em estudo mais recente, RAIJ et alii (1986) comprovaram a superioridade do método da resina trocadora de íons em relação aos demais métodos utilizados no Brasil, para estimar o P-extraível do solo. Nesse trabalho foram analisados os dados de 28 experimentos de campo de adubação fosfatada para o algodoeiro e um ensaio em vasos com a cultura de arroz inundado.

Devido ao satisfatório desempenho para diferentes tipos de solos (textura, teores de óxidos de Al e Fe), e que receberam fosfatos de diversas solubilidades em água e citrato, os laboratórios de análise de solos do Estado de São Paulo e de alguns outros estados utilizam rotineiramente o método da resina para estimar o P-extraível.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação química e agronômica de fontes de fósforo em função da granulometria e de diferentes períodos de incubação no solo, foi conduzido um ensaio em vasos, sob condições de casa de vegetação, com três cultivos consecutivos de soja.

Para verificar os efeitos práticos da granulação, métodos de aplicação e doses do superfosfato triplo sobre a cultura da soja, foi conduzido um ensaio de campo.

3.1. Experimento em casa de vegetação

3.1.1. O solo

O substrato do ensaio foi um solo Latossolo Vermelho Escuro Álico A moderado textura muito argilosa fase cerrado tropical subcaducifólio relevo plano (EMBRAPA/SNLCS - EPAMIG-DRNR, 1982), recentemente desmatado da Fazenda Planalto, município de Uberlândia, MG. Uma amostra composta coletada da camada superficial de 0-20 cm, com aproximadamente 600 kg de solo, foi transferida para o local da experimentação, a Seção de Fertilidade do Solo do

Centro de Energia Nuclear na Agricultura, em Piracicaba. Após seca ao ar, a amostra foi destorroada e peneirada em malha com abertura de 2,5 mm. A análise química desta amostra revelou o resultado apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da análise do solo dos experimentos em casa de vegetação e de campo.

Análises	Experimentos	
	Casa de vegetação	Campo
pH em CaCl_2	4,0	4,1
Matéria orgânica (%)	4,6	4,1
Fósforo resina ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	4,0	5,0
Potássio ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	0,10	0,08
Cálcio ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	0,2	0,1
Magnésio ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	0,1	0,1
H + Al ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	6,0	5,2
SB ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	0,4	0,3
CTC ($\text{meq}/100 \text{ cm}^2$)	6,4	5,5
V (%)	6,0	5,5
SiO_2 (%)	18,7	
Al_2O_3 (%)	26,1	
Fe_2O_3 (%)	8,7	
TiO_2 (%)	1,3	
Necessidade de calagem (t/ha)	4,1	3,5

3.1.2. Correção da acidez do solo

A correção da acidez do solo foi efetuada segundo a metodologia preconizada por RAIJ et alii (1985) que leva em consideração a diferença entre a saturação de bases adequada (70% para a soja) e a inicial, bem como a capacidade de troca de cátions, para calcular a dosagem de calcário (100% PRNT) a aplicar. Conforme essa recomendação, aplicou-se 4,1 t/ha de calcário dolomítico calcinado, com garantia de 120% de PRNT. Essa dosagem correspondeu a 1,71 g/kg de solo, considerando-se que um hectare contenha 2000 t de solo na camada superficial de 0-20 cm.

Após a homogeneização, a mistura solo-calcário foi acondicionada em um saco plástico e incubada por dois meses, com adições periódicas de água para manutenção da umidade em torno de 70% da capacidade de campo.

3.1.3. Os tratamentos

Os adubos formulados contendo individualmente o superfosfato triplo, o termofosfato sílico-magnésiano, o fosfato patos de minas parcialmente acidulado com o ácido sulfúrico (35%), o fosfato bicálcico e o fosfato natural de patos de minas, nas formas físicas de pó ou grânulos, foram incubados por quatro períodos com a amostra de solo caracterizada anteriormente. Os períodos de incubação por

1, 25, 81 e 169 dias foram iniciados de tal forma que todos tivessem o seu final na mesma data, que ocorreu em 23 de abril de 1988.

As composições químicas dos adubos testados no experimento estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados das análises dos adubos formulados contendo os fosfatos testados no experimento em casa de vegetação, válidos para as formas de pó e grânulo.

Análises ^{m/}	Fosfatos				
	Super. triplo	Termofosfato	Parcial. acid.	Bicálcico	Natural
N total	4,0	4,1	4,1	3,8	4,0
P ₂ O ₅ total	36,9	14,5	16,4	33,5	18,3
P ₂ O ₅ sol. citrato + H ₂ O	32,8	10,7	7,6	29,3	1,2
P ₂ O ₅ sol. H ₂ O	28,8	0,2	2,0	1,1	0,1
K ₂ O	9,2	8,5	7,9	9,2	8,4
CaO	16,8	-	-	30,1	23,6
MgO	-	10,5	-	-	-
SO ₄ ⁻²	-	-	14,1	-	-
S	-	-	4,7	-	-

^{m/} Realizada na Ultrafertil S.A. Indústria e Comércio de Fertilizantes de Cubatão.

Através de um ensaio preliminar com a mesma amostra de solo e tendo como fonte de fósforo o superfosfato triplo, selecionou-se a dose de 40 mg de P total / kg de solo, como sendo adequada para discriminar os fosfatos quanto à eficiência agronômica no suprimento daquele nutriente.

3.1.4. Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente ao acaso num esquema fatorial 5x2x4, com cinco fontes de P, duas granulometrias e quatro períodos de incubação dos fosfatos no solo. Foram feitas três repetições dos tratamentos. A testemunha sem a aplicação de fosfato foi incluída como tratamento adicional, o qual além de estimar o potencial de disponibilidade do fósforo nativo, permite calcular o índice de eficiência agronômica de cada fosfato avaliado.

3.1.5. Adubação, semeadura e cultivo da soja

Encerrados os períodos da incubação, 2,8 kg das amostras da mistura solo-fosfato foram adicionadas em vasos de plástico. Para evitar fatores nutricionais que não sejam os de fósforo, foram aplicados em cada vaso, 280 mg de nitrogênio na forma de sulfato de amônio, 280 mg de

potássio na forma de cloreto e 56 mg de um óxido silicatado que continha: B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn.

A planta indicadora dos tratamentos foi a soja, cultivares Doko, IAC-9 e IAC-9, respectivamente no primeiro, segundo e terceiro cultivo. Os dois últimos cultivos foram conduzidos para verificar o efeito residual, reaplicando-se praticamente a mesma adubação básica a cada semeadura. Os cultivos foram realizados dentro de casa de vegetação, sem controle da temperatura e da umidade relativa do ar do ambiente.

As semeaduras foram efetuadas nos dias 23/04/88, 06/12/88 e 15/05/89, deixando-se quatro plântulas por vaso após o desbaste. A umidade do solo foi mantida aproximadamente a capacidade de campo com irrigações diárias. Além da adubação em cobertura previamente programada via água de irrigação de 140 mg de N e 140 mg de K por vaso, aplicou-se Ca, Mg e uma mistura de micronutrientes (todos isentos de P) via foliar, nas plantas do segundo e do terceiro cultivos.

As plantas foram colhidas com 55 dias de idade, através de cortes a 1 cm da superfície do solo. A parte aérea das plantas foi seca em estufa a 65° C com circulação forçada de ar, pesada e posteriormente moída para análise química.

Para o segundo e o terceiro cultivo, o solo foi destorreado, as raízes retiradas, sendo o mesmo devolvido aos vasos.

3.1.6. Análises químicas das plantas e dos solos

A matéria seca da parte aérea das plantas de soja do primeiro e do terceiro cultivo foi moída e mineralizada através da digestão seca em mufla a 500^o C, durante duas horas, conforme a metodologia de BATAGLIA et alii (1983) para a determinação de fósforo. Por outro lado, os materiais vegetais do segundo cultivo foram analisados utilizando-se da técnica da digestão úmida, através da solução nitroperclórica conforme preconizado por BATAGLIA et alii (1983).

Amostras de solo coletadas ao final dos períodos de incubação e após o primeiro cultivo foram analisadas através do método da resina trocadora de íons preconizada por RAIJ et alii (1986) e através do método do ácido sulfúrico a 0,05N (RAIJ & ZULLO, 1977). A fim de diminuir o efeito do tempo de decantação (geralmente uma noite) que aumentaria a solubilização dos fosfatos, principalmente aqueles de baixa eficiência, o segundo método foi modificado, substituindo a decantação por filtração imediatamente após a agitação.

3.1.7. Avaliação dos tratamentos

Os tratamentos foram avaliados através dos seguintes parâmetros: produção de matéria seca da parte aérea das plantas, concentração de fósforo no tecido

vegetal seco, fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja, fósforo extraído do solo por dois métodos e índice de eficiência agronômica dos fosfatos.

A fórmula matemática que permitiu calcular esse índice foi:

$$IEA = 100 \cdot (F - T) (ST - T)^{-1},$$

onde o F foi o fosfato em teste, T a testemunha e ST o superfosfato triplo. Os parâmetros utilizados para o cálculo desse índice foram a produção de matéria seca da parte aérea das plantas e o total de fósforo absorvido pelos tecidos.

3.1.8. Análise de variância e de regressão

A análise estatística dos dados foi feita no microcomputador PC, utilizando-se do pacote SAS. Para a comparação entre as médias foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.2. Experimento de campo

3.2.1. O solo

O experimento de campo foi instalado e conduzido durante o ano agrícola de 1986/87 no solo caracterizado no item 3.1.1.

A característica química de uma amostra composta coletada na camada superficial de 0-20 cm está apresentada na Tabela 1. O solo apresentou alta acidez, baixa saturação em bases e baixos teores de fósforo, características essas muito representativas dos solos de cerrado do Brasil Central. Essas condições são ideais para avaliar os níveis e os métodos de aplicação de fertilizante fosfatado.

3.2.2. Correção do solo

A acidez do solo da área experimental foi corrigida visando proporcionar condições ideais para o desenvolvimento da soja. A dose de 3,5 t/ha de calcário dolomítico (100% PRNT) aplicada, foi baseada na necessidade para elevar a saturação de bases para 70%, conforme as sugestões de RAIJ et alii (1985). O calcário utilizado apresentava a garantia de 70% de PRNT.

A incorporação do calcário na camada de 0-20 cm, juntamente com 120 kg/ha de K_2O como cloreto de potássio, 500 kg/ha de gesso agrícola e 40 kg/ha de um óxido silicatado contendo todos os micronutrientes exceto o Cl, foi efetuada com uma aração e uma gradagem.

3.2.3. Os tratamentos

Os tratamentos consistiram das combinações de doses, métodos e granulometrias do fertilizante fosfatado aplicado. Como fonte foi utilizado o superfosfato triplo (46,1% de P_2O_5 total) que foi aplicado a lanço e no sulco da semeadura. As doses aplicadas a lanço foram de 80, 160 e 240 kg/ha de P_2O_5 total nas formas de pó ou grânulo. A testemunha sem o superfosfato triplo foi incluída para servir a ambas as granulometrias. Os níveis aplicados no sulco foram de 0, 40, 80 e 120 kg/ha de P_2O_5 total na forma de grânulo.

A incorporação de fosfato adicionado a lanço foi com uma gradeação com corte até a profundidade de 15 cm.

3.2.4. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados em esquema fatorial $3 \times 2 \times 4 + 4$, com três doses de fosfato aplicadas a lanço, duas granulometrias deste fosfato, quatro doses de fosfato aplicadas no sulco e mais quatro tratamentos sem a aplicação a lanço. O experimento foi conduzido com três repetições num total de 84 parcelas.

3.2.5. Semeadura, cultivo e colheita da soja

Cada parcela experimental consistiu de uma área de 4,2 x 5,0 m, separada uma da outra por corredores de 0,6 m e 1,0 m, respectivamente nas laterais e nas cabeceiras. O espaçamento entre os sulcos foi de 0,6 m.

As sementes de soja cultivar Doko inoculadas com a bactéria *Rhizobium japonicum* foram semeadas em 04/12/1986, na mesma data da aplicação do superfosfato triplo e 44 dias após a correção do solo. No sulco, foi aplicado ainda o potássio na dose de 40 kg/ha de K₂O na forma de cloreto.

Após a germinação, foi feito o desbaste deixando-se aproximadamente 20 plantas por metro linear, conforme o programa pré-estabelecido. Dessa forma, pode-se manter uniforme em todas as parcelas, a população de plantas de soja, durante o seu cultivo. A cultura foi mantida isenta de concorrência das ervas daninhas através de capinas manuais.

A colheita foi efetuada em 20/05/1987, colhendo-se as plantas da área útil, ou seja as cinco linhas centrais e deixando-se 1,0 m de cada cabeceira da parcela. Antes da trilha para a obtenção de produção de grãos, foram anotados os seguintes parâmetros: altura da planta, altura da inserção da primeira vagem e "stand" final.

3.2.6. Amostragens e análises de folhas e solos

No estágio de máximo florescimento das plantas de soja, suas folhas foram coletadas seguindo-se as recomendações da COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG (1989) para a determinação dos teores de fósforo.

O preparo da amostra, a marcha de mineralização via seca a extração e a determinação foram efetuados de acordo com o trabalho de BATAGLIA et alii (1983).

Durante o cultivo da soja foram efetuadas quatro amostragens do solo, localizadas nos sulcos e entre os sulcos. As épocas de amostragens foram feitas em períodos aproximadamente equidistantes, sendo a primeira efetuada um mês após a semeadura e a última, logo após a colheita. Cada amostra composta originou-se de seis amostragens na camada de 0-20 cm.

Após obtida a TFSA, todas as amostras foram analisadas determinando-se o teor de fósforo disponível pelo método do ácido sulfúrico, H_2SO_4 0,05 N (RAIJ & ZULLO, 1977) enquanto somente as amostras oriundas dos tratamentos a lanço na ausência da aplicação de fósforo no sulco, foram avaliadas pelo método da resina trocadora de íons preconizados por RAIJ et alii, (1986).

3.2.7. Análise de variância e de regressão

A análise estatística dos dados foi efetuada no microcomputador PC, utilizando-se do pacote SAS, enquanto a superfície de resposta foi obtida através do programa SAEST. Os contrastes entre as médias foi feita através do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio em casa de vegetação

4.1.1. Análise de solo

Estão apresentados na Tabela 3 somente os resultados da análise de solo após a incubação com os fosfatos por 1 e 169 dias e antes da semeadura de soja. Observa-se que as condições químicas do solo são as mais favoráveis para o desenvolvimento normal de plantas de soja. A calagem elevou o pH e a saturação de bases bem como os teores trocáveis de cálcio e magnésio a valores desejáveis. Dentre os fosfatos, o termofosfato atingiu o maior índice de pH que não decresceu com um maior período de incubação como ocorreu com as demais fontes de fósforo. Essa capacidade de corrigir a acidez do solo, também observada por MELLO et alii (1981), foi devido ao íon silicato presente nos termofosfatos e foi pequena em relação à dose aplicada de 40 ppm de P, que correspondeu a aproximadamente 183 kg/ha de P_2O_5 total. A contribuição de cálcio e de magnésio pelos fosfatos foi desprezível também face a dose utilizada. Pelo maior teor desses cátions nos tratamentos com 169 dias de incubação, comprova-se que houve reação entre o solo e os fosfatos.

Tabela 3. Resultados da análise do solo após a incubação com os fosfatos por 1 e 169 dias.

Fosfatos	pH	H+Al	Ca	Mg	K	SB	CTC	V
	CaCl ₂	emg/100 cm ²						%
ST-G ^{1/}	5,4	2,3	2,1	1,6	0,15	3,85	6,15	63
ST-P	5,4	2,3	2,3	1,6	0,15	4,05	6,35	64
TY-G	5,5	2,2	2,1	1,6	0,21	3,91	6,11	64
TY-P	5,5	2,2	2,2	1,6	0,22	4,02	6,22	65
PA-G	5,5	2,3	2,3	1,7	0,13	4,13	6,43	64
PA-P	5,4	2,2	2,5	1,7	0,19	4,39	6,59	67
FB-G	5,5	2,2	2,4	1,7	0,19	4,29	6,49	66
FB-P	5,5	2,3	2,4	1,6	0,15	4,15	6,45	64
FN-G	5,4	2,3	2,3	1,7	0,18	4,18	6,48	65
FN-P	5,4	2,3	2,2	1,6	0,16	3,96	6,26	63
Testemunha	5,4	2,3	2,1	1,5	0,10	3,70	6,00	62
ST-G ^{2/}	5,3	2,4	2,3	1,6	0,15	4,05	6,45	63
ST-P	5,4	2,5	2,3	1,6	0,14	4,04	6,54	62
TY-G	5,5	2,3	2,7	1,8	0,17	4,67	6,97	67
TY-P	5,5	2,2	2,5	1,8	0,21	4,51	6,71	67
PA-G	5,3	2,5	2,6	1,7	0,21	4,51	7,01	64
PA-P	5,3	2,4	2,6	1,7	0,21	4,51	6,91	65
FB-G	5,3	2,4	2,6	1,7	0,20	4,50	6,90	65
FB-P	5,3	2,4	2,5	1,7	0,15	4,35	6,75	64
FN-G	5,3	2,5	2,5	1,8	0,20	4,50	7,00	64
FN-P	5,2	2,5	2,3	1,6	0,17	4,07	6,57	62
Testemunha	5,3	2,4	2,1	1,5	0,14	3,74	6,14	61

^{1/} e ^{2/} Incubação por 1 e 169 dias, respectivamente.

ST = Superfosfato triplo, TY = Termofosfato, PA = Parcialmente acidulado,
 FB = Fosfato bicálcico, FN = Fosfato natural. G = Grânulo e P = pó.

Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentados os teores de fósforo do solo após os períodos de incubação.

Tabela 4 Fósforo "disponível" extraído pelo método H_2SO_4 , 0,05 N, após os períodos de incubação dos fosfatos. Médias de duas análises.

Fosfatos	Períodos de incubação (dias)			
	1	25	81	169
	ppm			
ST-G	8,5	6,9	7,8	7,1
ST-P	<u>10,1</u>	6,4	5,4	5,2
TY-G	1,2	13,2	16,8	<u>14,3</u>
TY-P	<u>16,9</u>	5,8	5,0	4,5
PA-G	1,3	7,4	9,1	<u>12,3</u>
PA-P	<u>14,7</u>	12,0	10,3	11,9
FB-G	<u>15,8</u>	4,6	11,4	7,1
FB-P	<u>13,7</u>	6,0	5,4	5,5
FN-G	9,8	6,1	10,7	6,0
FN-P	<u>13,6</u>	16,9	14,1	19,0
Testemunha	1,2	1,5	1,0	1,0

ST = Superfosfato triplo,
PA = Parcialmente acidulado,
FN = Fosfato natural.
G = Grânulo e P = pó.

TY = Termofosfato,
FB = Fosfato bicálcico,

Tabela 5. Fósforo "disponível" extraído pelo método da resina após os períodos de incubação dos fosfatos.

Fosfatos	Períodos de incubação (dias)			
	1	25	81	169
	ppm			
ST-G	11,5	13,6	13,6	15,6
ST-P	17,7 /	7,4 /	7,4	7,4
TY-G	2,7	12,3	17,7	17,7
TY-P	11,5 /	9,5 /	10,5	7,4
PA-G	2,7	6,6	6,6	7,4
PA-P	10,5	6,6	7,4	7,4
FB-G	22,2	8,4	11,5	24,5
FB-P	29,4	15,6	11,5	10,5
FN-G	6,6	4,5	5,5	4,5
FN-P	6,6	6,7	6,6	6,8
Testemunha	2,7	2,6	2,7	2,6
ST = Superfosfato triplo, TY = Termofosfato, PA = Parcialmente acidulado, FB = Fosfato bicálcico, FN = Fosfato natural. G = Grânulo e P = pó.				

Nas amostragens do solo para a análise e no revolvimento do solo após cada cultivo, observaram-se ainda a presença de grânulos ou resíduos do mesmo, nos tratamentos que receberam esta forma física do fosfato.

Isto foi notado até naqueles tratamentos de maior período de incubação, o que, provavelmente acarretou um erro devido ao acaso. Isto pode ter ocorrido principalmente na incubação por 1 dia, pois os grânulos permaneceram intactos ao amostrar o solo. Presume-se que estes comentários são válidos mesmo para aqueles grânulos que apresentaram maior facilidade de difusão do fosfato, pois a concentração deste nutriente não deve ser constante em todo o volume ao redor do grânulo.

Os teores de fósforo disponível extraídos pelo método de H_2SO_4 0,05 N (Tabela 4) e resina trocadora de íons (Tabela 5) variaram conforme as fontes e a granulometria dos adubos, bem como, conforme os períodos de incubação. Assim, com exceção do fosfato bicálcico (Tabela 4), todos os demais proporcionaram maiores teores de fósforo na forma de pó com 1 dia de incubação, na extração pelos dois métodos. Por outro lado, com 169 dias de incubação, a maioria dos fosfatos proporcionou teores superiores de fósforo quando foi aplicado na forma de grânulo. Estes resultados evidenciaram que os fosfatos de maior solubilidade em citrato de amônio mais água foram beneficiados com a granulação, quando incubados por maiores períodos e desfavorecidos quando aplicados na forma de pó. Explica-se este fenômeno pela lenta mas gradual liberação do fosfato aplicado na forma de grânulo, concentrando-o num menor volume do solo e dessa forma, sofrendo menor taxa de fixação, o que não aconteceria com a forma de pó, pela

maior taxa de dissolução e maior contato com os colóides do solo, aumentando desta maneira a sua retenção ou precipitação. Caso houvesse revolvimento ou mistura periódica do sistema em incubação, a taxa de recuperação de fósforo seria mais baixa, conforme demonstraram NOVAIS et alii (1985) e SOUSA & VOLKWEISS (1987c), em decorrência do maior contato entre o fosfato dissolvido e as partículas do solo.

Como era previsível, o único fosfato cujo comportamento se desviou da regra foi o natural pois a forma de pó proporcionou maior recuperação de fósforo em quaisquer períodos de incubação e métodos.

Os estudos de níveis críticos de fósforo no solo, como os de FREIRE et alii (1979) geralmente levaram em consideração somente os métodos de extração e os diferentes tipos de solo. Os dados da Tabela 4 e 5 demonstram a necessidade de estudos que levem também em consideração fatores importantes como, outras fontes solúveis em citrato de amônio mais água, granulometria do fosfato e tempo de aplicação no solo. Seguramente, os níveis críticos são também função desses fatores, ao analisar os dados de ambas as tabelas.

O método do ácido sulfúrico 0,05 N teve alto poder de extração de fósforo quando se utilizou fosfatos que continham pelo menos algum resíduo da apatita, como foi o caso do fosfato natural de patos de minas e o parcialmente acidulado de patos de minas (Tabela 4), cujos

resultados concordam com aqueles obtidos por TANAKA et alii (1978) e CORDEIRO (1979b).

De acordo com COPE & EVANS (1985) a solução extratora de Mehlich (ácido duplo) que tem uma eficiência semelhante à solução H_2SO_4 0,05 N, tem a capacidade de dissolver fosfatos ligados ao cálcio como os da apatita, superestimando dessa forma a disponibilidade do nutriente e tornando-a inadequada em solos que receberam fosfatos naturais ou parcialmente acidulados.

Boa parte da eficiência de um método de extração de fósforo do solo está relacionada à sua capacidade de extrair proporcionalmente a fração do fosfato solúvel em citrato de amônio mais água. Levando-se em consideração este fator, demonstra-se também a melhor discriminação da disponibilidade de fósforo oriundo de diversas fontes, como no presente trabalho, com o método da resina. Assim, a ordem decrescente do teor de fósforo extraído pela resina (Tabela 5) foi, fosfato bicálcico, superfosfato triplo, termofosfato, parcialmente acidulado e fosfato natural, os quais em relação ao teor total de fósforo, os teores solúveis em citrato de amônio mais água foram respectivamente de 87, 89, 74, 46 e 7%. A superioridade técnica e prática do método de resina foi demonstrada em revisão de literatura por RAIJ (1978) e em trabalhos que envolveram respostas das culturas por RAIJ & DIEST (1980) e RAIJ et alii (1986). A melhor eficiência da resina foi comprovada também por CABALA & SANTANA (1983)

quando foram empregadas rochas fosfatadas; por GRANDE et alii (1986) e RAIJ et alii (1986) em solos de várzeas ou alagados e por OLIVEIRA (1986) em solos de textura arenosa e argilosa. Por outro lado, SFREDO (1979) e TANAKA (1981) pesquisando os diferentes extratos de soluções ácidas e de sais, verificaram uma eficiência semelhante entre os mesmos, quando o solo foi adubado com uma fonte solúvel de fósforo, o mesmo não sendo observado em tratamentos que receberam fosfato de baixa solubilidade.

4.1.2. Resposta da soja ao primeiro cultivo

O resumo da análise de variância dos parâmetros: produção de matéria seca da parte aérea, concentração de fósforo nesse material e fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja está apresentado no Apêndice 1. Para efeito desta análise, foi considerada como tratamento normal como qualquer outro, a testemunha como uma fonte de fósforo e como mais um tratamento de granulometria. Observou-se efeito significativo dos fatores, períodos de incubação, fontes de fósforo e granulometria, bem como da interação tempos de incubação x fontes de fósforo sobre os três parâmetros analisados e da interação, períodos de incubação x granulometria sobre a concentração de fósforo.

Na Tabela 6 estão apresentados os dados da produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja

em função das fontes de fósforo e dos períodos de incubação.

Apesar da baixa produção em relação aos cultivos posteriores, esse parâmetro conseguiu discriminar estatisticamente os efeitos de diversos fosfatos e de diferentes períodos de incubação. Todas as fontes de fósforo que apresentavam um significativo teor do nutriente solúvel em citrato de amônio mais água em relação ao teor

Tabela 6. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfatos e períodos de incubação. 1^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (dias)				
	1	25	81	169	Média
	g/vaso				
Superfosfato triplo	3,57 a	2,21 b	2,20 b	2,19 b	2,54 AB
Termofosfato	2,39 a	2,49 a	2,51 a	2,92 a	2,58 A
Parcialmente acidulado	3,46 a	2,28 b	2,19 b	1,97 b	2,47 AB
Fosfato bicálcico	2,76 a	2,56 a	2,23 a	2,47 a	2,51 AB
Fosfato natural	2,21 a	2,46 a	2,08 a	2,06 a	2,20 BC
Testemunha	1,90 a	1,88 a	1,88 a	1,96 a	1,91 C
Média	2,79 a	2,35 b	2,21 b	2,29 b	----

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

total, não diferiram entre si. Naturalmente que a eficiência relativa de diferentes fosfatos no suprimento do nutriente às plantas é função da dose aplicada. Assim, em doses elevadas, uma fonte de baixo poder de suprimento pode ter um comportamento semelhante àquela que apresenta alta solubilidade.

A eficiência do termofosfato, relatada por GARGANTINI & SANTOS (1971); GOEDERT & LOBATO (1984) e GOEDERT et alii (1988), foi comprovada no presente trabalho, o qual se sobressai melhor em solos altamente intemperizados como os de cerrado e tem ainda a capacidade de corrigir a acidez do solo (MELLO et alii, 1981), além de contribuir com alguns nutrientes acompanhantes, altamente deficientes nesses solos, como por exemplo o magnésio.

O fosfato parcialmente acidulado de patos de minas com uma taxa de acidulação de 35% (relação ácido sulfúrico / fosfato natural igual a 0,35/1), apresentou produção de matéria seca estatisticamente semelhante à fonte testemunha que foi o superfosfato triplo. Esse comportamento pode ser atribuído à produção limitada ou mais seguramente à quantidade de fração acidificada ser suficiente para este cultivo (Tabela 6). FREIRE et alii (1983) relataram que o fosfato parcialmente acidulado apresentou uma eficiência intermediária entre o natural e o solúvel, tendo o sorgo como planta teste. Por outro lado, FERNANDES & KAMINSKI (1987) concluíram que as relações de

acidulação do fosfato de Araxá não afetaram o fósforo absorvido pelas plantas de sorgo, soja e aveia em cultivo sucessivo, quando consideraram o teor de fósforo solúvel em citrato de amônio mais água. Dessa forma, estes autores inferiram que somente a fração acidulada contribuiu para suprir as plantas de fósforo, ao contrário dos dados da literatura que consideraram o fósforo total também como fonte supridora. GOEDERT & SOUSA (1986) relataram que a eficiência inicial do parcialmente acidulado estava relacionada com o nível de acidulação e também com a solubilidade em água, ácido cítrico e citrato de amônio.

Segundo GUARDANI & VARARELLI (1984) no aspecto industrial, a produção de fosfato parcialmente acidulado apresenta certas vantagens como: tecnologia simples, possibilidade de se utilizar matéria prima com elevado teor de impurezas e menor consumo de enxofre. No aspecto global, essas vantagens deverão ainda superar a baixa eficiência dessa fonte de fósforo, para suprirem culturas de rápido crescimento, o menor efeito residual e principalmente a ineficiência da fração não solubilizada que permanece com as propriedades de uma apatita de baixa reatividade, mesmo a médio prazo.

Na média, a incubação prejudicou o desempenho dos fosfatos (Tabela 6), principalmente aquelas fontes que apresentaram maior solubilidade em água como o superfosfato triplo e o parcialmente acidulado. Atribuiu-se este fenômeno à rápida dissolução do fosfato e sua consequente

reação com as partículas do solo, formando produtos mais estáveis e de menor disponibilidade para as plantas, ou seja, logo após o contato entre as duas partes, a atividade do fosfato na solução do solo é bruscamente aumentada, chegando a máxima disponibilidade em pouco tempo e a partir desse momento, apesar da contínua dissolução ainda do fosfato em menor taxa, predomina a reação de estabilização do mesmo.

O termofosfato teve uma tendência de ser beneficiado com a incubação, mostrando ser um fertilizante de solubilização lenta ou controlada e/ou que apresenta fosfatos em formas que reagem com menor intensidade com o solo, propriedades que o torna como uma das melhores fontes de fósforo para solos com alta capacidade de retenção do nutriente.

O fosfato bicálcico não foi influenciado pelo tempo de incubação provavelmente por conter pouco fósforo solúvel em água. O fosfato natural cuja produção de matéria seca da parte aérea (Tabela 6) não diferiu estatisticamente da testemunha sem fósforo, não se beneficiou do tempo de incubação para a sua solubilização.

Dados da concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fósforo e períodos de incubação estão apresentados na Tabela 7. Houve uma estreita relação direta entre a produção de matéria seca e a concentração de fósforo neste material.

Tabela 7. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 1^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (dias)				
	1	25	81	169	Média
	P (%)				
Superfosfato triplo	0,115 a	0,091 b	0,078 c	0,091 b	0,094 AB
Termofosfato	0,098 a	0,082 b	0,083 b	0,093 ab	0,089 BC
Parcialmente acidulado	0,105 a	0,079 b	0,078 b	0,088 b	0,087 CD
Fosfato bicálcico	0,106 a	0,086 b	0,097 ab	0,102 a	0,098 A
Fosfato natural	0,090 a	0,074 b	0,091 a	0,094 a	0,087 CD
Testemunha	0,092 a	0,068 b	0,078 b	0,090 a	0,082 D
Média	0,102 a	0,081 d	0,085 c	0,093 b	-----

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os efeitos dos fosfatos e dos tempos de incubação sobre o fósforo absorvido pelas plantas de soja estão apresentados nas Tabelas 8 e 9 e Figura 1. Observa-se que todos os fosfatos que apresentavam elevados teores de fósforo solúvel em citrato mais água em relação aos teores totais proporcionaram suprimento em fósforo estatisticamente semelhantes (Tabela 8). Estes dados concordam com aqueles obtidos por FERNANDES & KAMINSKI

(1987), GOEDERT & SOUSA (1986) e FRIESEN et alii (1987), os quais concluíram que a eficiência agronômica inicial dos fosfatos estava diretamente relacionada com a solubilidade dos mesmos em citrato de amônio mais água. Na média dos fosfatos, observou-se que a maior quantidade de fósforo absorvido ocorreu com a incubação por um dia, evidenciando a época de aplicação de fósforo no solo que proporcionou a maior taxa de aproveitamento. Questiona-se portanto da fosfatagem como método de suprir eficientemente o nutriente a longo prazo, principalmente quando se utiliza fosfato de alta solubilidade em água.

O efeito da interação significativa entre os fosfatos e os tempos de incubação sobre o fósforo absorvido está apresentado na forma de equações (Tabela 9) e na forma de ilustrações (Figura 1). O coeficiente positivo do componente quadrático da equação (Tabela 9) comprova o declínio da absorção do fósforo com o período de incubação (Figura 1), sendo aqueles entre 25 e 81 dias, os de menor aproveitamento pelas plantas, independentemente das fontes de fósforo.

A queda acentuada na absorção de fósforo no início da incubação (1 a 25 dias), principalmente das fontes mais solúveis em água como o superfosfato triplo e o parcialmente acidulado está de acordo com a previsão de LARSEN citado por VOLKWEISS & RAIJ (1977). Esta rápida retenção de fósforo aplicado ao solo na forma solúvel também foi comprovada por LOURENÇO (1971) e REZENDE (1974)

em estudo de laboratório. NOVAIS et alii (1980) verificaram também que a incubação do fosfato de Araxá por, 0, 73, 123 e 253 dias teve efeito linear negativo sobre a produção de matéria seca do sorgo, a concentração nos tecidos e no fósforo absorvido e acumulado. No presente trabalho não se observou efeito dos períodos de incubação do fosfato natural de patos de minas sobre a resposta das plantas de soja.

Tabela 8. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 1^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (dias)				
	1	25	81	169	Média
	P (mg/vaso)				
Superfosfato triplo	4,48 a	2,00 b	1,71 b	1,98 b	2,54 A
Termofosfato	2,36 a	2,05 a	2,10 a	2,71 a	2,31 AB
Parcialmente acidulado	3,58 a	1,80 b	1,71 b	1,74 b	2,21 AB
Fosfato bicálcico	2,93 a	2,23 a	2,17 a	2,53 a	2,47 A
Fosfato natural	1,99 a	1,82 a	1,88 a	1,93 a	1,91 B
Testemunha	1,75 a	1,27 a	1,47 a	1,76 a	1,56 C
Média	2,95 a	1,92 b	1,88 b	2,14 b	- -

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 9. Relações entre os períodos de incubação dos fosfatos com o solo e o fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja, do primeiro cultivo.

Fosfatos	Granulometria	Equações ^{1/}	R ² (%)
Superfosfato triplo	Grânulo	$P = 8,25 - 1,515 * D + 0,0810 * D^2$	94
Termofosfato	Grânulo	$P = 2,24 - 0,069 * D + 0,0079 * D^2$	52
	Pó	$P = 2,82 - 0,280 * D + 0,0209 * D^2$	51
Parcialmente acidulado	Grânulo	$P = 3,56 - 0,424 * D + 0,0223 * D^2$	70
	Pó	$P = 4,46 - 0,649 * D + 0,0343 * D^2$	69
Fosfato bicálcico	Grânulo	$P = 2,95 - 0,305 * D + 0,0186 * D^2$	40

^{1/} Variável dependente é o fósforo absorvido e a independente é o período de incubação transformado em (n. de dias)^{0,5}.

O fosfato bicálcico e especialmente o termofosfato apresentaram comportamento distinto em relação ao superfosfato triplo no suprimento de fósforo para as plantas no que se refere a tempo de incubação, pois a queda anteriormente comentada não foi tão acentuada. Diferenciaram-se também pela elevação da disponibilidade de fósforo aos 169 dias de incubação, a níveis iguais ou superiores aos iniciais. Este fenômeno pode ser atribuído à menor solubilidade em água dos fosfatos em questão.

Na Tabela 10 estão apresentados os efeitos da granulometria dos fosfatos sobre o fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja. Como era previsível,

Figura 1. Efeito dos períodos de incubação dos fosfatos com o solo, sobre o fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja do primeiro cultivo.

devido a sua rápida solubilização, o superfosfato triplo comportou-se melhor com a granulação. O grânulo propicia uma menor superfície de contato com as partículas do solo e conseqüentemente, menor retenção. O termofosfato, devido à suas características químicas e o parcialmente acidulado, devido ao menor teor de fósforo solúvel em água não sofreram efeito da granulação, enquanto que o fosfato bicálcico proporcionou maior absorção ao ser granulado. Como os resultados alcançados por FERREIRA & KAMINSKI (1979), no presente trabalho, não se observou variação na liberação do fósforo do fosfato natural com a granulação, comprovando ser um material praticamente ineficiente no suprimento deste nutriente.

Tabela 10. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e granulometrias. 1º Cultivo.

Fosfatos	Granulometrias	
	Grânulo	Pó
	----- P (mg/vaso) -----	
Superfosfato triplo	3,23 a	1,85 b
Termofosfato	2,30 a	2,31 a
Parcialmente acidulado	2,14 a	2,28 a
Bicálcico	2,83 a	2,10 b
Natural	1,90 a	1,91 a

Valores seguidos das mesmas letras na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.3. Resposta de soja ao segundo e terceiro cultivos

O resumo da análise da variância dos parâmetros analisados da soja está apresentado no Apêndice 1. Nas Tabelas 11 a 16 estão apresentados os dados do segundo e terceiros cultivos de produção de matéria seca, concentração de fósforo neste material vegetal e fósforo absorvido em função das fontes de fósforo e dos períodos de incubação. O estudo do fator, períodos de incubação dos fosfatos, a partir do segundo cultivo ficou prejudicado pois cada tratamento incluiu a mais, o período dos cultivos anteriores e o tempo até efetuar a semeadura. Entretanto para uma avaliação das fontes de fósforo e granulometria das mesmas, não há maiores restrições.

Em relação aos dados do cultivo inicial, todos os três parâmetros apresentaram valores substancialmente maiores, o que permitiu discriminar mais claramente o comportamento das fontes de fósforo, pois a amplitude entre os valores foi maior. Assim, tanto na produção de matéria seca (Tabelas 11 e 14) como no fósforo absorvido (Tabelas 13 e 16), foi observada a superioridade significativa das fontes que apresentaram maior porcentagem de solubilidade em citrato de amônio mais água em relação ao teor de fósforo total, apesar de serem de dados já de efeitos residuais. FERNANDES & KAMINSKI (1987), FRIESEN et alii (1987) e GOEDERT & SOUSA (1986) também relataram que a

Tabela 11 Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				
	7	8	10	13	Média
	----- g/vaso -----				
Superfosfato triplo	7,64 b	7,71 b	8,55 b	11,85 a	8,94 AB
Termofosfato	7,25 b	8,12 b	7,27 b	10,70 a	8,33 B
Parcialmente acidulado	6,41 b	6,46 b	4,98 c	8,85 a	6,68 C
Fosfato bicálcico	7,20 c	10,71 a	8,97 b	10,67 a	9,39 A
Fosfato natural	3,38 b	3,16 b	3,51 ab	4,68 a	3,68 D
Testemunha	2,96 b	3,18 b	3,39 ab	4,59 a	3,53 D
Média	6,07 c	6,84 b	6,36 c	8,92 a	- -

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

eficiência de diversos fosfatos estava relacionada diretamente à taxa do fósforo solúvel em citrato de amônio mais água em relação ao teor total de fósforo.

O comportamento agronômico do termofosfato ficou ligeiramente inferior ao superfosfato triplo, podendo ser atribuído à diminuição da acidez pela calagem a um valor sub-ótimo para a sua máxima liberação de fósforo. Nos trabalhos entre outros de, GOEDERT & LOBATO (1984) e

TANAKA et alii (1984), ficou evidenciada a superioridade daquela fonte aplicada em solos de cerrado, no suprimento de fósforo.

A eficiência do fosfato parcialmente acidulado foi intermediária entre o fosfato natural e o superfosfato triplo, concordando com os dados alcançados por FERREIRA & KAMINSKI (1979), FREIRE et alii (1983) e GOEDERT & SOUSA (1986). Os tempos de incubação (Tabela 11 e

Tabela 12. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				
	7	8	10	13	Média
	----- P (%) -----				
Superfosfato triplo	0,136 a	0,128 ab	0,138 a	0,111 b	0,128 A
Termofosfato	0,130 a	0,125 a	0,134 a	0,118 a	0,127 A
Parcialmente acidulado	0,123 a	0,119 a	0,111 a	0,126 a	0,120 A
Fosfato bicálcico	0,134 a	0,132 a	0,117 a	0,124 a	0,127 A
Fosfato natural	0,080 a	0,081 a	0,075 a	0,095 a	0,083 B
Testemunha	0,078 a	0,080 a	0,075 a	0,094 a	0,082 B
Média	0,117 a	0,114 a	0,113 a	0,111 a	- -

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

14) não resultaram em dados consistentes do fosfato parcialmente acidulado, principalmente no terceiro cultivo. Num ensaio de campo, GOEDERT et alii (1988) não observaram variações da eficiência agronômica do fosfato parcialmente acidulado de patos de minas, entre os quatro anos de cultivo da soja. A comparação foi efetuada com o superfosfato triplo, sendo ambos aplicados anualmente em doses crescentes.

Tabela 13 Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 2^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				
	7	8	10	13	Média
	P (mg/vaso)				
Superfosfato triplo	10,41 b	9,69 b	11,74 ab	13,10 a	11,24 AB
Termofosfato	9,40 b	10,03 b	9,56 b	12,76 a	10,44 B
Parcialmente acidulado	7,91 b	7,65 bc	5,48 c	11,12 a	8,04 C
Fosfato bicálcico	9,64 b	14,15 a	10,48 b	13,19 a	11,86 A
Fosfato natural	2,70 a	2,56 a	2,60 a	4,42 a	3,07 D
Testemunha	2,31 a	2,55 a	2,50 a	4,30 a	2,91 D
Média	7,49 c	8,25 b	7,48 c	10,32 a	- -

Valores seguidos das mesmas letras na vertical (maiúsculas) ou na horizontal (minúsculas), não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O fosfato natural de patos de minas foi ineficiente também no segundo e terceiro cultivos no suprimento de fósforo às plantas de soja, pois não apresentou diferença mínima significativa quando comparada à testemunha, o tratamento sem a aplicação de fosfato. Dados semelhantes foram alcançados por CORDEIRO (1979), FERREIRA & KAMINSKI (1979), GOEDERT & LOBATO (1984), TANAKA (1978) e TANAKA et alii (1984). Conforme os trabalhos de GOEDERT & LOBATO (1984), também não se observou efeito compensador do fosfato natural em relação à fonte testemunha, com um maior período de incubação ou no seu efeito residual. Isto inviabiliza no aspecto técnico e econômico a utilização de fosfato natural de baixa solubilidade, em culturas anuais de alta exigência e de rápido crescimento, ao contrário de alguns fosfatos dos Estados Unidos, e Norte da África que apresentam efeitos imediatos e residuais agronomicamente aceitáveis, devido às suas características químicas e mineralógicas.

A eficiência agronômica do fosfato bicálcico foi semelhante ou até superior ao fosfato monocálcico, representado pelo superfosfato triplo (Tabelas 11, 13, 14 e 16). Ambas as fontes de fosfato apresentam alta taxa de solubilidade em citrato de amônio do fósforo total. O que diferencia entre si é o pH da solução saturada, pois o do fosfato monocálcico é de 1,0-1,5 enquanto do bicálcico é de 6,5 (SAMPLE et alii, 1980). Considerando-se que a atividade dos cátions "fixadores" de fósforo é aumentada com a

Tabela 14. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				Média
	13	14	16	19	
	g/vaso				
Superfosfato triplo	6,09	4,87	5,68	6,90	5,89 A
Termofosfato	4,83	4,81	5,43	5,37	5,11 B
Parcialmente acidulado	5,17	4,08	4,11	5,09	4,61 B
Fosfato bicálcico	6,33	6,30	5,73	5,93	6,07 A
Fosfato natural	3,07	2,86	2,94	3,55	3,11 C
Testemunha	2,61	3,31	3,08	3,48	3,12 C
Média	4,87 ab	4,47 b	4,63 b	5,20 a	- -

Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

acidez, a primeira fonte de fosfato foi influenciada negativamente, e a segunda não sofreu a ação daqueles cátions, inferindo-se então o melhor comportamento agronômico do fosfato bicálcico.

Os maiores períodos de incubação (13 e 19 meses) proporcionaram valores maiores dos dados de produção de matéria seca e fósforo absorvido, evidenciando em parte que a fixação de fósforo é um processo reversível.

Nas Tabelas 12 e 15 estão apresentados os dados de concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em decorrência dos fosfatos e dos tempos de incubação. Verificou-se uma queda da concentração do segundo (Tabela 12) para o terceiro cultivo (Tabela 15), revelando um menor potencial de suprimento de fósforo, devido à fração exportada pelos cultivos anteriores e/ou pela maior fixação de fósforo pelo solo. Esta tendência também foi observada sobre a produção de matéria seca e consequentemente refletida no fósforo absorvido.

Tabela 15. Concentração de fósforo na matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				Média
	13	14	16	19	
	P (%)				
Superfosfato triplo	0,111	0,109	0,103	0,100	0,106 A
Termofosfato	0,109	0,111	0,095	0,086	0,100 B
Parcialmente acidulado	0,099	0,100	0,096	0,106	0,100 B
Fosfato bicálcico	0,116	0,104	0,107	0,110	0,109 A
Fosfato natural	0,083	0,081	0,077	0,091	0,083 C
Testemunha	0,086	0,071	0,077	0,089	0,081 C
Média	0,102 a	0,098 ab	0,094 c	0,097 bc	----

Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A concentração de fósforo no tecido vegetal variou de forma direta e proporcional à solubilidade do fertilizante ao citrato de amônio mais água, comprovando que a previsão da eficácia do adubo pode ser estimada por aquela análise química.

Tabela 16. Fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja em função de fontes de fosfato e períodos de incubação. 3^o Cultivo.

Fosfatos	Períodos de incubação (meses)				Média
	13	14	16	19	
	P (mg/vaso)				
Superfosfato triplo	6,69	5,34	5,85	6,90	6,19 A
Termofosfato	5,27	5,37	5,10	4,71	5,11 B
Parcialmente acidulado	5,02	4,06	3,97	5,37	4,61 B
Fosfato bicálcico	7,35	6,55	6,15	6,58	6,66 A
Fosfato natural	2,52	2,30	2,26	3,26	2,58 C
Testemunha	2,26	2,33	2,37	3,10	2,52 C
Média	5,08 a	4,50 b	4,46 b	5,16 a	----

Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.1.4. Resposta acumulada de soja aos três cultivos

Os dados de produção de matéria seca e do fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de soja oriundos dos três cultivos foram analisados cumulativamente, a fim de verificar os efeitos generalizados das fontes de fósforo, da granulometria dos fertilizantes fosfatados e da interação entre ambos os fatores. Nesses dois parâmetros da avaliação foram calculados os índices de eficiência agronômica (IEA), que tem a vantagem de eliminar o efeito do suprimento do fósforo nativo do solo e portanto expressar somente o potencial do fosfato em teste em relação à fonte testemunha, no caso o superfosfato triplo.

Um resumo da análise de variância daqueles dados está apresentado no Apêndice 2. Observou-se efeitos estatisticamente significativos de fontes de fósforo, granulometria dos fosfatos e da interação entre as variáveis analisadas.

Os contrastes entre as médias dos dados de produção acumulada de matéria seca e também entre as médias do IEA estão apresentados nas Tabelas 17 e 18, respectivamente. A avaliação através destes dois parâmetros permitiu inferir que a eficiência no suprimento de fósforo dos diferentes fosfatos foi proporcional à maior solubilidade em citrato de amônio mais água em relação ao teor total de fósforo de cada fertilizante. Assim, a ordem

Tabela 17. Produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja em função das fontes de fósforo e granulometrias. Dados acumulados de três cultivos.

Fontes	Granulometrias		
	Grânulo	Pó	Média
	g/vaso		
Superfosfato triplo	75,0 a	63,9 b	69,5 A
Termofosfato	68,0 a	60,2 b	64,1 B
Parcialmente acidulado	57,1 a	52,9 b	55,0 C
Fosfato bicálcico	76,0 a	67,7 b	71,8 A
Fosfato natural	35,0 a	37,0 a	36,0 D
Testemunha	34,2 a	34,2 a	34,2 D
Média	57,6 a	52,7 b	- -

Valores seguidos da mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

decrecente da eficiência agrônômica dos fosfatos foi a seguinte: fosfato bicálcico que apresentou 87% do fósforo total, solúvel em citrato de amônio mais água; superfosfato triplo com 89%; termofosfato com 74%; parcialmente acidulado com 46% e o fosfato natural com 7%. Estas informações, reforçadas pelas de FERNANDES & KAMINSKI (1987), FRIESEN et alii (1987) e GOEDERT & SOUSA (1986)

possibilitam sugerir que as doses da adubação fosfatada sejam baseadas nos teores solúveis em citrato de amônio mais água, ao invés do teor total. Dessa forma, garante-se uma eficiência agronômica satisfatória, enquanto a análise econômica é que deve indicar a viabilidade do uso de cada fosfato.

Tabela 18. índice de eficiência agronômica do parâmetro produção acumulada de matéria seca da parte aérea de plantas de soja em função das fontes de fósforo e granulometrias.

Fontes	Granulometrias		
	Grânulo	Pó	Média
	----- % -----		
Superfosfato triplo	100,0 a	72,7 b	86,3 A
Termofosfato	82,7 a	63,7 b	73,2 B
Parcialmente acidulado	56,0 a	46,3 b	51,2 C
Fosfato bicálcico	102,7 a	82,3 b	92,5 A
Fosfato natural	1,3 a	6,7 a	4,0 B
Testemunha	0,0 a	0,0 a	0,0 D
Média	57,1 a	45,3 b	- -

Valores seguidos da mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Com exceção do fosfato natural, todos os demais fosfatos evidenciaram a vantagem da granulação a fim de aumentar a sua eficiência, seja na produção de matéria seca (Tabela 17) como também no IEA (Tabela 18). Um maior aproveitamento do fósforo solúvel em água com a granulação foi relatado por SUAREZ & IGUE (1974) e SOUSA & VOLKWEISS (1987a). Devido à alta solubilidade desta fonte, a granulação diminui a superfície de contato solo-fosfato e fosfato-solução, diminuindo desta forma a adsorção e a precipitação com Al, Fe e Mn, o que permite manter por período mais prolongado o fósforo-lábil e o fósforo-solução.

O mesmo efeito benéfico da granulação do termofosfato observado no presente trabalho não foi relatado por SILVA (1987). Este autor não detectou diferença entre três granulometrias do termofosfato sobre a produção de matéria seca do sorgo sacarino. Outro fator a regular a eficiência da granulação sobre o aproveitamento do fósforo pelas plantas é o material agregante utilizado. Assim, CHATTERJEE et alii (1983) observaram que a granulação do fosfato de Maldeota fez decrescer a eficiência na seguinte ordem: sem granulação, granulação com uréia e granulação com o nitrato de amônio. No presente estudo, os materiais agregantes para todos os fosfatos foram a uréia e o cloreto de potássio.

NOVAIS (1983) estudando o fosfato parcialmente acidulado de Araxá e STEPHEN (1985) o da Carolina do Norte chegaram à mesma conclusão, qual seja, de

que a granulação em menor partícula proporcionou maior aproveitamento pelas plantas de capim gambá e azevém, respectivamente. Estes dados discordam do presente trabalho, pois a granulação foi benéfica para o fosfato de patos de minas parcialmente acidulado. Neste caso, este fertilizante comportou-se como uma fonte altamente solúvel, o que é passível de ter ocorrido em vista da solubilidade de 46% do total do seu fósforo ser solúvel em citrato de amônio e principalmente pela dose aplicada de 40 ppm de fósforo.

Para o fosfato natural de patos de minas, a granulação não se traduziu em alterações do comportamento agronômico. FERREIRA & KAMINSKI (1979) também concluíram que um fosfato natural em pó ou grânulo foi ineficiente para suprir a soja em fósforo.

Os dados de fósforo absorvido e acumulado pela parte aérea de plantas de soja e os seus índices de eficiência agronômica (IEA) estão respectivamente apresentados nas Tabelas 19 e 20. Os contrastes entre as médias seguiram as mesmas tendências da produção acumulada de matéria seca e o seu IEA, evidenciando que qualquer um dos dados determinados discriminaram bem o comportamento diferencial entre as fontes de fósforo e as granulometrias.

De acordo com o estudo elaborado por RAIJ (1986), o fosfato alternativo, no caso o parcialmente acidulado de patos de minas, o seu uso não seria economicamente viável pois não atingiu um IEA mínimo de 80%.

Tabela 19. Fósforo absorvido pela parte aérea de plantas de soja em função das fontes e granulometrias dos fosfatos. Dados acumulados dos três cultivos.

Fontes	Granulometrias		
	Grânulo	Pó	Média
	----- mg P/vaso -----		
Superfosfato triplo	85,8 a	74,0 b	79,9 A
Termofosfato	77,5 a	65,4 b	71,4 B
Parcialmente acidulado	61,8 a	57,1 a	59,4 C
Fosfato bicálcico	87,5 a	80,4 b	83,9 A
Fosfato natural	28,9 a	31,7 a	30,3 D
Testemunha	28,0 a	28,0 a	28,0 D
Média	61,6 a	56,1 b	- -

Valores seguidos da mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Reporte-se que a eficiência agronômica do fosfato é influenciada também pela acidez do solo. Assim, os fosfatos que apresentaram maiores solubilidades em água, como o superfosfato, foram beneficiados pela calagem, enquanto os fosfatos que dependeram da acidez para a sua solubilização como o fosfato natural foram prejudicados por aquela prática. Deve-se salientar que para a soja revelar o

seu potencial máximo de crescimento, ela exige valores de pH do solo em água ao redor de 6,0-6,5.

Tabela 20. índice de eficiência agronômica do parâmetro fósforo absorvido e acumulado pela parte aérea de plantas de soja em função de fontes e granulometrias dos fosfatos.

Fontes	Granulometrias		
	Grânulo	Pó	Média
	----- % -----		
Superfosfato triplo	100,0 a	79,7 b	89,8 A
Termofosfato	87,3 a	64,7 b	76,0 B
Parcialmente acidulado	58,7 a	50,7 a	54,7 C
Fosfato bicálcico	105,0 a	91,0 b	98,0 A
Fosfato natural	3,7 a	6,7 a	5,2 D
Testemunha	0,0 a	0,0 a	0,0 D
Média	59,1 a	48,8 b	- -

Valores seguidos da mesma letra minúscula na horizontal e maiúscula na vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.2. Experimento de campo

4.2.1. Análise do solo

No apêndice 3 estão apresentados os resumos da análise de variância dos dados dos teores de fósforo extraível pelo método de H_2SO_4 0,05 N. Comprova-se através dos coeficientes de variação (CV) que o erro devido ao acaso é muito alto, o que é comum para a análise de fósforo, principalmente quando as amostras são coletadas nos sulcos da semeadura. Uma parte deste erro pode ser atribuído ao relativo pequeno número de amostras simples coletadas.

Apesar dos altos valores do CV o teste F revelou que houve diferenças significativas entre os tratamentos, doses a lanço quando coletadas nos sulcos e entre os sulcos e doses no sulco quando coletadas nos sulcos, o que está coerente com as variações das doses de fósforo aplicadas no solo.

Na Tabela 21 estão apresentados os teores de fósforo extraídos pela solução H_2SO_4 0,05 N, em função das aplicações de fósforo a lanço na forma de pó e amostragens entre os sulcos em quatro épocas, enquanto na Tabela 22 estão apresentados os dados dos mesmos tratamentos oriundos do superfosfato triplo granulado. Estes dados referem-se somente ao efeito do fósforo aplicado a lanço, visto que as amostragens do solo foram feitas nos tratamentos que não receberam fósforo no sulco.

Tabela 21. Fósforo do solo extraído pela solução H_2SO_4 0,05 N em 4 épocas de amostragem durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de pó.

P ₂ O ₅ a	Épocas de amostragem entre os sulcos ^{m/}				
	1	2	3	4	Média
kg/ha	P (ppm)				
0	2,2	3,5	2,1	2,1	2,5
80	3,5	3,3	3,6	2,8	3,3
160	3,7	6,3	4,2	3,8	4,5
240	4,5	7,6	5,0	8,8	6,5
Média	3,5	5,2	3,7	4,4	- -

^{m/} 1 - um mês após a semeadura; 4 - imediatamente após a colheita; 2 e 3 - aproximadamente equidistantes de 1 e 4

Comparando-se os teores de fósforo oriundos de aplicações do superfosfato triplo pó (Tabela 21) e do superfosfato triplo grânulado (Tabela 22), observa-se aparentemente que os valores são semelhantes para os mesmos tratamentos de doses. Pode-se inferir daí que o método de extração utilizado não diferencia as duas formas físicas do adubo, seja pela sua natureza, seja pela transformação que o fertilizante tenha sofrido ao reagir no solo. SOUSA & VOLKWEISS (1987b) observaram que a maior parte do fósforo dissolvido dos grânulos do superfosfato triplo havia

reagido através do mecanismo de precipitação com Al, Fe e Ca e que cerca de um quarto do fósforo original dos grânulos ainda permaneciam nos seus resíduos, como fosfato dicálcico dihidratado precipitado, após onze meses da incubação. Deve-se salientar que a metodologia utilizada no presente trabalho na decantação por aproximadamente 15 h após a agitação do solo-solução extratora pode ter igualado o efeito da granulometria, principalmente das primeiras épocas de amostragem, dissolvendo os grânulos remanescentes.

Tabela 22. Fósforo do solo extraído pela solução H_2SO_4 0,05 N em 4 épocas de amostragem durante o cultivo de soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de grânulo.

P ₂ O ₅ a	Épocas de amostragem entre os sulcos ^{m/}				
	1	2	3	4	Média
kg/ha	P (ppm)				
0	2,2	3,5	2,1	2,1	2,5
80	3,4	4,4	4,0	3,9	3,9
160	5,5	4,8	4,0	4,9	4,8
240	5,7	7,0	5,2	7,1	6,3
Média	4,2	4,9	3,8	4,5	- -

^{m/} 1 - um mês após a semeadura; 4 - imediatamente após a colheita; 2 e 3 - aproximadamente equidistantes de 1 e 4

As doses crescentes de fósforo aplicadas proporcionaram também elevação dos teores de fósforo no solo, entretanto não atingiram o nível crítico de 10 ppm para um solo argiloso, sugerido pela CFSEMG (1989). Essa COMISSÃO preconiza o uso do extrator de Mehlich cuja capacidade extratora é semelhante à de H_2SO_4 0,05 N

As épocas de amostragem não proporcionaram teores consistentes de fósforo (Tabelas 21 e 22) como também não foram constatados no estudo de incubação com o superfosfato triplo pó e grânulo (Tabelas 4 e 5). FEITOSA (1978) observou pouca variação nos teores de fósforo com os períodos de incubação por 10, 30 e 120 dias, de diversos fosfatos, inclusive um solúvel em água. Por outro lado, BARBOSA FILHO (1986) verificou diminuição do teor de fósforo extraído pelos métodos de Olsen e Bray-1 com a incubação de um fosfato solúvel em água com o solo até 180 dias. SYERS & MACKAY (1986) também observaram a maior retenção de fósforo através do extrator de Olsen, com o tempo de incubação de fósforo com o solo.

Neste estudo de campo, não se constatou decréscimo nos teores de fósforo no solo provavelmente pela estabilidade de fósforo dissolvido já ter ocorrido na época da primeira amostragem. LOURENÇO (1971), REZENDE (1974) e HUGHES & GILKES (1986) relataram a ocorrência de uma rápida (alguns minutos ou horas) retenção de fósforo adicionado ao solo. GONÇALVES (1988) e MOREIRA (1988) verificaram que o tempo de contato entre o fosfato e o solo fez decrescer o teor de fósforo recuperado em quatro extratores químicos,

sendo este decréscimo mais acentuado nos primeiros 15-20 dias. Caso o solo do presente estudo tivesse a característica semelhante aos solos dos dois últimos trabalhos, poderia inferir-se que não haveria variações significativas entre as quatro amostragens efetuadas sobre os teores de fósforo.

Na Tabela 23 estão apresentados os teores de fósforo extraível pela resina em função das doses de fósforo aplicadas a lanço como pó e das quatro épocas de amostragem e na Tabela 24, os teores oriundos dos tratamentos que receberam o fertilizante granulado. A coleta entre os sulcos foi realizada nos tratamentos que não receberam o adubo fosfatado no sulco.

Comparando-se os dados das Tabelas 21 e 22 com os das Tabelas 23 e 24, observou-se que o método de extração de fósforo pela resina teve maior capacidade, provocando uma maior amplitude o que torna a determinação do nível crítico mais fácil e preciso, além da maior confiabilidade na interpretação das classes de fertilidade do solo.

Como o método do ácido sulfúrico, também o da resina não foi capaz de detectar uma possível variação nos teores de fósforo, em diferentes granulometrias do superfosfato triplo aplicado a lanço e em quatro épocas de amostragem do solo. Mesmo a dose aplicada de 240 kg/ha de P_2O_5 total, que corresponde a 54 ppm na camada de 0-20 cm, atingiu o nível satisfatório de 16 ppm, preconizado por RAIJ et alii (1985). Pressupõe-se portanto que este solo

apresenta alta capacidade de adsorção de fósforo e consequentemente alta capacidade tampão, devido ao teor de argila.

A recuperação de fósforo do solo através dos métodos de H_2SO_4 0,05 N e da resina em função das aplicações de fósforo a lanço ou sulco, exclusivamente, está representada na Figura 2.

Tabela 23. Fósforo do solo extraído pelo método de resina em 4 épocas de amostragem durante o cultivo da soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanço na forma de pó.

P ₂ O ₅ a	Épocas de amostragem entre os sulcos ^{*/}				
	1	2	3	4	Média
kg/ha	----- P (ppm) -----				
0	4,9	5,4	5,3	6,0	5,4
80	5,6	5,5	6,2	6,8	6,0
160	7,0	9,2	7,6	8,5	8,1
240	8,8	12,9	11,2	12,8	11,4
Média	6,6	8,3	7,6	8,5	- -

^{*/} 1 - um mês após a semeadura; 4 - imediatamente após a colheita; 2 e 3 - aproximadamente equidistantes de 1 e 4

Tabela 24. Fósforo do solo extraído pelo método de resina em 4 épocas de amostragem durante o cultivo de soja, em função somente das aplicações de fósforo a lanco na forma de grânulo.

P ₂ O ₅ a	Épocas de amostragem entre os sulcos a/				
	1	2	3	4	Média
Lanco	1	2	3	4	Média
kg/ha	P (ppm)				
0	4,9	5,4	5,3	6,0	5,4
80	6,9	7,0	6,5	8,0	7,1
160	9,1	8,4	8,6	10,5	9,2
240	9,3	11,5	9,8	12,7	10,8
Média	7,6	8,1	7,6	9,3	- -

1 - um mês após a semeadura; 4 - imediatamente após a colheita; 2 e 3 - aproximadamente equidistantes de 1 e 4

Na Figura 2a verificou-se que o fósforo nativo foi mais extraído pela resina do que pelo ácido. Comprovando a maior capacidade de extração da resina, foi maior o coeficiente angular da sua equação de 0,107 contra 0,081 da equação obtida com o método de H₂SO₄. Essa maior declividade da curva é que proporciona uma maior amplitude entre os teores de fósforo, com as suas vantagens já comentadas anteriormente.

Figura 2. Fósforo recuperado do solo em dois extratores, após aplicação de superfosfato triplo exclusivamente a lanço (a) ou no sulco (b)

A relação entre o fósforo recuperado pelo extrator de ácido sulfúrico e o fósforo aplicado no sulco da semeadura está ilustrada na Figura 2b. Analisando-se as duas figuras que têm como variável dependente o teor extraído de fósforo em ácido, verifica-se que apesar das menores doses aplicadas no sulco, o seu coeficiente angular é substancialmente maior, o que significa na prática que o fósforo aplicado no sulco fica algumas vezes concentrado. Por exemplo, a dose aplicada de 80 kg/ha de $P_{25}O_5$ total, que correspondem a 18 ppm se fossem aplicadas a lanço seriam recuperados 3,8 ppm, enquanto que, se aplicados no sulco, a sua recuperação seria de 10,1 ppm. Logicamente o primeiro tratamento além do efeito da diluição haverá maior influência do solo na adsorção e precipitação do fósforo solubilizado, diminuindo desta maneira de forma mais acentuada a menor taxa de recuperação de fósforo, o que deve ser sentida também pelas plantas.

4.2.2. Respostas de cultura da soja aos tratamentos

O primeiro cultivo da soja em solos de cerrado recém desmatado pode apresentar problemas de natureza patológica, comumente causados por microorganismos do solo. Isto foi observado no presente trabalho, quando a cultura encontrava-se no estágio de maturação, com o sistema radicular afetado e as vagens sem o desenvolvimento normal dos grãos, diminuindo desta maneira a produtividade.

Atribuiu-se ao fungo Rosellinia o causador deste problema que foi observado em qualquer parcela, independentemente dos tratamentos.

No Apêndice 3 estão apresentados os resumos da análise de variância dos dados de produtividade de grãos de soja e da concentração de fósforo na matéria seca das folhas de soja. Em ambos os parâmetros, houve efeitos significativos das doses de aplicação de fósforo a lanço, das doses de aplicação no sulco, da interação entre estes dois fatores e da granulometria. Este último fator apresenta valores de F relativamente elevados devido a análise ter considerada a ausência de aplicação de fósforo a lanço como um nível de fator granulometria.

Na Tabela 25 estão apresentados os dados de produtividade de grãos de soja, concentração de fósforo nas folhas e teores de fósforo no solo extraídos pelo método do ácido. Verificou-se no rendimento da cultura e na concentração de fósforo, que tanto a aplicação de fósforo a lanço quanto no sulco proporcionaram acréscimos significativos, indicando a carência do nutriente no solo. A concentração do nutriente na planta não variou com a aplicação do superfosfato triplo na forma de pó ou grânulo. A análise de fósforo no solo revelou maior teor das amostras oriundas das coletas efetuadas nos sulcos devido à concentração neste método de aplicação. Nas amostragens efetuadas entre os sulcos verificou-se uma variação somente devido à aplicação de fósforo a lanço.

Tabela 25. Produtividade de grãos de soja, concentração de fósforo nas folhas e fósforo disponível no solo extraído pelo H_2SO_4 0,05N em função da aplicação de fósforo solúvel nas formas de pó e grânulo. Efeito médio das doses de fósforo aplicadas a lanco e no sulco.

Granulometria	Prod.	Conc.	Fósforo disponível ^m							
	de grãos	de P	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	ES ₁	ES ₂	ES ₃	ES ₄
	kg/ha	(%)	P (ppm)							
Sem fósforo	1267	0,178	8,5	8,0	5,7	7,5	2,4	3,0	2,4	2,2
Pó	1698	0,226	9,6	9,3	6,3	12,6	4,3	6,2	5,0	4,0
Grânulo	1771	0,225	9,0	10,7	7,0	12,4	5,1	7,4	5,7	5,6

^m S e ES - Amostragem do solo no sulco e entre sulco respectivamente em 4 épocas de amostragem durante o cultivo de soja.

Os dados de concentração de fósforo nas folhas de soja em função das aplicações de fosfato a lanco na forma de grânulo e pó e das aplicações de fosfato no sulco na forma de grânulo estão apresentados na Tabela 26, enquanto os dados de produtividade de grãos estão apresentados na Tabela 27.

Observaram-se teores crescentes de fósforo nas folhas com as doses aplicadas tanto a lanco como no sulco, sendo que o máximo teor (0,257% P) foi obtido com 240 kg/ha de P_2O_5 aplicado a lanco, associado com 80 kg/ha P_2O_5 aplicado no sulco. De acordo com as interpretações

utilizadas no Brasil, (TRANI et alii, 1983), somente esta concentração está dentro do nível de suficiência. As demais concentrações estão dentro do nível baixo, apesar de altas doses aplicadas, o que permite inferir que, ou os níveis de interpretações de outros países utilizados no Brasil são inadequados para os nossos genótipos e solos, ou realmente as doses adicionadas não proporcionaram teores disponíveis do nutriente no solo capazes de suprir suficientemente as plantas de soja.

Tabela 26. Concentração de fósforo nas folhas de soja em função de aplicação de fósforo a lanço e no sulco.

P ₂ O ₅ a	Sulco - P ₂ O ₅ (kg/ha)				

Lanço	0	40	80	120	Média

(kg/ha)	P (%) -----				
0	0,170	0,175	0,177	0,190	0,178
80	0,204	0,189	0,218	0,242	0,213
160	0,220	0,223	0,217	0,230	0,222
240	0,222	0,245	0,257	0,239	0,241

Média	0,209	0,213	0,223	0,230	

A produtividade de soja de 1002 kg/ha da testemunha (Tabela 27) revela que este solo não é tão pobre, como é normal em solos de cerrado, conforme evidenciaram os dados de TANAKA et alii (1984b) e PEDROSO NETO & TANAKA (1988), entre outros. Apesar desta relativa alta potencialidade do solo em suprir o fósforo nativo, houve resposta as aplicações de fósforo a lanço e também no sulco, proporcionando até o dobro da produtividade da testemunha, quando se associou 240 kg/ha de P_{205} a lanço com 120 kg/ha de P_{205} no sulco.

Tabela 27: Produtividade de grãos de soja em função de aplicação de fósforo a lanço e no sulco.

Sulco - P ₂ O ₅ (kg/ha)					
P ₂ O ₅					
a					
Lanço	0	40	80	120	Média
(kg/ha)	kg/ha				
0	1002	1059	1345	1663	1267
80	1403	1442	1612	1906	1591
160	1695	1715	1661	1815	1721
240	1753	1929	1883	2008	1893
Média	1529	1604	1665	1874	

As figuras dos Apêndices 4, 5 e 6 ilustram através de superfícies de resposta as interações observadas sobre as concentrações de fósforo nas folhas, dos fatores, aplicação de fosfato a lanço e no sulco, respectivamente para efeito médio das duas granulometrias, do efeito do superfosfato aplicado como pó e superfosfato aplicado como grânulo. Os efeitos dos mesmos tratamentos sobre a produtividade de soja estão representados na Figura 3 e nos Apêndices 7 e 8. Neste parâmetro, as variações são mais visíveis devido às amplitudes serem de aproximadamente o dobro do valor da testemunha (sem a aplicação de superfosfato triplo).

Através principalmente da Figura 3 e dos Apêndices 7 e 8 observa-se um declínio ou decréscimo dos efeitos das doses de superfosfato triplo aplicado no sulco, quando associadas a fosfatagens de maiores doses. Resultados semelhantes também foram relatados por TANAKA et alii (1984). Essa elevação instantânea através de fosfatagem corretiva a lanço, ou a elevação gradual através de aplicação de fosfato solúvel no sulco em doses superiores à necessidade de manutenção por alguns cultivos, faz com que a adubação fosfatada anual seja de menor dose. No aspecto econômico da prática de fosfatagem, há a desvantagem da necessidade de um grande investimento no primeiro cultivo, e no aspecto agrônômico as reações com o solo podem diminuir o seu efeito.

A taxa de aproveitamento pelas culturas do fósforo aplicado ao solo é considerada baixa, mesmo

Figura 3. Produtividade de soja. - Superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo a lanço na forma de pó e granulada, e da aplicação no sulco.

$$Y = 994 + 5,1 * L - 5,9 * 10^{-2} * L^2 + 2,6 * S + 2,3 * 10^{-2} * S^2 - 1,9 * 10^{-2} * L * S$$

$$R^2 = 0,947$$

considerando o efeito residual cumulativamente. Isto porque a concentração de fósforo na solução do solo permanece relativamente baixa apesar da alta dose aplicada na forma solúvel. O manejo da adubação fosfatada visa aumentar a sua eficiência através de métodos de aplicação e/ou granulação. No presente trabalho verificou-se que o método de aplicação no sulco na dose de 120 kg/ha de P_2O_5 e na ausência de aplicação a lanço, proporcionou rendimentos de soja quase equivalentes a aquelas doses superiores aplicadas a lanço, podendo-se desta forma considerar a aplicação no sulco como mais interessante que a aplicação a lanço (Figuras 4 e 5). Estudos realizados no campo por PEDROSO NETO & TANAKA (1988) e TANAKA et alii (1988) e em casa de vegetação por BORKERT & BARBER (1985a e 1985b); MACHADO et alii (1983); MAGALHÃES (1974) e RAIJ (1979) também evidenciaram uma maior eficiência agronômica dos fosfatos solúveis quando aplicados de forma localizada, como no sulco da semeadura, ou misturado a um menor volume do solo. Por outro lado, YOST et alii (1975) reportaram após vários cultivos com o milho a ocorrência de equivalência agronômica entre a dose única do fosfato aplicado a lanço e o seu parcelamento em diversos anos aplicado no sulco, enquanto REHM (1986) relatou a vantagem técnica da aplicação a lanço sobre a aplicação no sulco.

Essas contradições na eficiência de aproveitamento do fósforo solúvel em função dos métodos de aplicação provavelmente se devem mais às características físico-químicas e mineralógicas do solo que controlam a

Figura 4. Resposta da soja à aplicação de fósforo no sulco associada à aplicação a lance (média das granulometrias). (a) Produtividade de grãos e (b) Teor de fósforo nas folhas.

Figura 5. Resposta da soja à aplicação de fósforo no sulco associada à aplicação a lanco na forma de grânulo. (a) Produtividade de grãos e (b) Concentração de fósforo nas folhas.

concentração de fósforo na solução e o fósforo-lábil, bem como ao equilíbrio entre as diversas formas do fosfato, após a sua solubilização no solo. Assim, teoricamente, um solo arenoso de baixa capacidade de adsorção de fósforo não apresentaria grandes variações no suprimento do nutriente aplicado tanto a lanço como no sulco.

Outra desvantagem da aplicação a lanço na forma corretiva de fósforo é que o manejo do solo como as arações e gradagens provocam o revolvimento das partículas do solo e neste caso, os trabalhos de NOVAIS et alii (1985) e SOUSA & VOLKWEISS (1987c) evidenciaram a perda de maneira mais acentuada da eficiência.

Os efeitos da granulometria sobre a cultura da soja podem ser visualizados na Tabela 25. Sobre a produtividade, houve uma ligeira superioridade do superfosfato aplicado como grânulo em relação ao pó. Isto indicou que a liberação lenta e concentrada, propiciou um maior aproveitamento de fósforo. Por outro lado, o fosfato aplicado na forma de pó, devido à maior superfície de contato com as partículas do solo, reagiram rapidamente, provocando a adsorção e/ou precipitação, tornando baixa a sua disponibilidade para as plantas. SUAREZ & IGUE (1974) relataram também o benefício causado pela granulação do superfosfato concentrado, como maior absorção de fósforo pelo milho e maior efeito residual. Já, SOUSA & VOLKWEISS (1987a) observaram benefício da granulação do superfosfato, somente na absorção de fósforo e ausência sobre a produção de matéria seca de plantas de soja.

Na Figura 6 estão representadas as curvas de resposta da produtividade de soja em função exclusivamente das aplicações do superfosfato triplo no sulco ou a lanço, e das concentrações de fósforo nas folhas enquanto na Tabela 28 estão apresentadas as suas equações. A aplicação a lanço (Figura 6a) aparenta ser um melhor tratamento do que a aplicação no sulco, contudo deve-se considerar que as doses aplicadas na primeira são duas vezes maiores em relação às aplicadas no sulco. A fosfatagem além de não proporcionar um substancial aumento sobre a produtividade da soja tem a desvantagem de exigir um maior investimento inicial e provocar um decréscimo do efeito residual, devido ao maior tempo de contato e o revolvimento com o solo, já anteriormente discutido. As relações matemáticas através de equações entre as variáveis da Figura 6 estão apresentadas na Tabela 28.

A influência da concentração de fósforo nas folhas dos tratamentos oriundos exclusivamente das aplicações de fósforo a lanço ou sulco sobre a produtividade de soja está representada na Figura 6b. De forma consistente, verificou-se, que para alcançar o mesmo rendimento, houve a necessidade de maior concentração de fósforo dos tratamentos que receberam o superfosfato triplo aplicado a lanço, ou seja, para obter-se a mesma produtividade de soja, foi necessária maior absorção de fósforo.

Figura 6. Produtividade de soja em função da aplicação isolada de fósforo a lanço e no sulco (a), e em função da concentração de fósforo nas folhas, oriundas dos mesmos tratamentos.

Tabela 28. Relações entre a produtividade de grãos de soja e o fósforo aplicado isoladamente a lanço e no sulco, e concentração de fósforo nas folhas dos mesmos tratamentos.

Método de aplicação	Equações ^{1/}	R ² (%)
Lanço	Prod. = 997 + 28,46 P - 0,252 P ²	99
Sulco	Prod. = 992 + 3,56 S - 0,852 S ²	99
Lanço	Prod. = 3359 - 35255 (% P) + 125840 (% P) ²	99
Sulco	Prod. = - 15770 + 155772 (% P) - 336822 (% P) ²	92

^{1/} Prod. = produtividade de grãos de soja; P = dose de P₂O₅ aplicado a lanço; S = dose de P₂O₅ aplicado no sulco, ambas em kg/ha; e % P = teor de fósforo nas folhas de soja oriundo da aplicação exclusivamente a lanço ou sulco.

A relação entre os teores de fósforo extraído pelo H₂SO₄ 0,05 N oriundo daquele aplicado exclusivamente no sulco e os rendimentos da soja está representada na Figura 7. Neste tipo de aplicação, a dose máxima aplicada de 120 kg/ha de P₂O₅ que proporcionou uma recuperação de 14,5 ppm de P em H₂SO₄ 0,05 N não foi suficiente para alcançar um rendimento físico máximo de grãos de soja. Esta característica de curva de resposta foi diferente da apresentada na Figura 8a, onde o fósforo foi aplicado a lanço em maiores doses e a recuperação através do extrator ácido foi menor, devido ao fator diluição. A Figura 8b relaciona o fósforo recuperado pela resina e a produtividade de soja. Devido à capacidade de extração diferenciada entre os métodos de H₂SO₄ 0,05 N e a resina,

os valores de fósforo no solo são diferentes, apresentando portanto faixas dos teores no solo diferentes na interpretação da análise do solo.

Figura 7. Curva de resposta da produtividade de soja ao teor de fósforo extraível em H₂SO₄ 0,05 N, oriundo da aplicação exclusivamente de fósforo no sulco. Amostragem do solo efetuada no sulco.

Figura 8. Curva de resposta da produtividade de soja em função do fósforo extraível pelos métodos de $H_2SO_4 \ 0,05N$ e da resina, oriundo da aplicação de fósforo a lanco no solo.

5. CONCLUSÕES

Nas condições realizadas, o presente trabalho permitiu extrair as seguintes conclusões:

5.1. Ensaio em casa de vegetação

- Após a incubação dos fosfatos, superfosfato triplo, termofosfato sílico-magnésiano, parcialmente acidulado, bicálcico e natural de patos, nas formas de pó ou grânulo, com um solo de cerrado durante, 1, 25, 81 e 169 dias, a análise do solo revelou diferenças quanto ao teor de fósforo extraível, mas não quanto às demais características químicas determinadas.

- A granulação dos fosfatos solúveis em citrato de amônio mais água e incubados por períodos mais longos proporcionou maiores teores de fósforo extraível pelos métodos de H_2SO_4 0,05 N e resina trocadora de íons, enquanto a incubação por apenas um dia dos fosfatos na forma de pó foi suficiente para proporcionar valores máximos de extração de fósforo.

- Para cada fosfato, a capacidade de extração de fósforo pelo método da resina acompanhou diretamente a sua solubilidade em citrato de amônio mais água; a mesma tendência não foi observada pelo método do ácido sulfúrico.

- Os fosfatos, superfosfato triplo, termofosfato sílico-magnésiano, parcialmente acidulado e bicálcico que apresentaram considerável fração de fósforo solúvel em citrato de amônio mais água foram equivalentes agronomicamente no primeiro cultivo, quando avaliados pela

produção de matéria seca da parte aérea de plantas de soja e pela absorção de fósforo pelo mesmo material.

- Os fosfatos de maior solubilidade em água, como o superfosfato triplo e o parcialmente acidulado tiveram diminuída a sua eficiência agronômica com o maior período de incubação. Ao contrário, os fosfatos de baixa solubilidade em água mas solúveis em citrato de amônio como o termofosfato, apresentaram uma melhor eficiência agrônômica com a incubação por 169 dias do que por um dia.

- Através da análise dos dados dos três cultivos de soja, tanto individualmente quanto acumulados, verificou-se que houve a seguinte ordem decrescente na eficiência agrônômica dos fosfatos: bicálcico > superfosfato triplo > termofosfato > parcialmente acidulado > natural de Patos = testemunha sem fósforo. Esta sequência também esteve relacionada à percentagem da fração solúvel em citrato de amônio mais água com a fração total de fósforo de cada fosfato

- A granulação do superfosfato triplo, do termofosfato e o do fosfato bicálcico aumentou sistematicamente a eficiência agrônômica destes fertilizantes, enquanto que para o fosfato natural de patos, essa técnica não trouxe vantagens.

5.2. Ensaio de campo

- Não houve variação consistente nos teores de fósforo do solo extraível tanto pelo H_2SO_4 0,05 N quanto pela resina trocadora de íons. Estes dois métodos de extração de fósforo também não discriminaram quantitativamente o superfosfato triplo aplicado na forma de pó da forma granular.

- O aproveitamento ou recuperação pela cultura da soja do fósforo aplicado no sulco foi maior em relação ao aplicado a lanço, quando se consideraram as doses equivalentes.

- Com as doses crescentes de fósforo aplicadas a lanço, houve redução no efeito daquele aplicado no sulco da semeadura, avaliada pela produtividade de grãos e teor de fósforo nas folhas de soja.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D.L., KUSSOW, W.R. & COREY, R.B. Phosphate rock dissolution in soil; indications from growth studies. Soil Sci. Soc. Am. J., 49(4):918-25, 1985.
- BARBOSA FILHO, M.P. Transformações do fósforo em solos ácidos e sua disponibilidade para a cultura de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.). Piracicaba, 1986. 104p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- BARBOSA FILHO, M.P.; KINJO, T. & MURAOKA, T. Relações entre fósforo extraído, frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. R. bras. Ci. Solo, 11:147-55, 1987.
- BARNES, J.S. & KAMPRATH, E.J. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. North Carolina Agricultural Experiment Station, 1975, 23p. (Tech. Bull.229).
- BATAGLIA, O.C.; MASCARENHAS, H.A.A.; TEIXEIRA, J.P.F. & TISSELLI FILHO, O. Acúmulo de matéria seca e nutrientes, em soja cultivar santa-rosa. Bragantia, 35:237-47, 1976.
- BATAGLIA, O.C. & MASCARENHAS, H.A.A. Absorção de nutrientes pela soja. Campinas, Instituto Agronômico, 1977. 36p. (Bol. Tec., 41).

- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R. & GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1983, 48p. (Boletim Técnico, 78).
- BATAGLIA, O.C.; MASCARENHAS, H.A.A. & NAGAI, V. Adubos fosfatados na absorção de fósforo pela soja em presença e ausência de calagem. *Bragantia*, 43(2):467-78, 1984.
- BOLLAND, M.D.A. & BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. *Aust. J. Agric. Res.*, 33(6):1061-71, 1982.
- BONATO, E.R. & BONATO, A.L.V. **A soja no Brasil; história e estatística**. Londrina, EMBRAPA / CNPSo, 1987. 61p. (Documentos, 21).
- BORKERT, C.M. & BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphorus placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:152-155, 1985a.
- BORKERT, C.M. & BARBER, S.A. Predicting the most efficient phosphorus placement for soybeans. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:901-904, 1985b.
- BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; FEITOSA, C.T.; HIROCE, R. & RAIJ, B. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. *R. bras. Ci. Solo*, 4:36-9, 1980.
- CABALA, R.P. & SANTANA, M.B.M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. *R. bras. Ci. Solo*, 7:109-18, 1983.

- CFSEMG. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Lavras, Comissão de Fertilidade do Estado de Minas Gerais, 1989, 176p. (4ª aproximação).
- CHATTERJEE, S.C.; DATTA, A.N. & GHOSH, S.K. Evaluation of low grade phosphate rock deposits in the Indian context. *Fertilizer and Agriculture*, 37(84):31-7, 1983.
- CHIEN, S.H. Dissolution rates os phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:656-657, 1977.
- CHIEN, S.H.; CLAYTON, W.R. & McCLELLAN, G.H. Kinetics of dissolution of phosphate rocks in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:260-4, 1980.
- COPE, J.T. & EVANS, C.E. Soil testing. *Adv. in Soil Science*, 1:201-288, 1985.
- CORDEIRO, D.S.; SFREDO, G.J.; BORKERT, C.M.; SARRUGE, J.R.; PALHANO, J.B. & CAMPO, R.J. Calagem, adubação e nutrição mineral. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CNPSo, Londrina. *Ecologia, manejo e adubação de soja*. Londrina, p. 19-49, 1979a (Circ. Tec., 2).
- CORDEIRO, D.S.; POTTKER, D.; BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J.; MESQUITA, A.N.; DITTRICH, R.C. & PALHANO, J.B. Efeito de níveis e fontes de fósforo na produção e no rendimento econômico da soja na região de Dourados (MS). *R. bras. Ci. Solo*, 3:100-5, 1979b.
- COUTO, C.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Efeito de características químicas, físicas e mineralógicas do solo sobre a solubilização de apatita de araxá. *R. bras. Ci. Solo*, 11:239-44, 1987.

EMBRAPA. Programa Nacional de Pesquisa de Soja; versão 3, Londrina, CNPSo, 1988. 104p. (Documentos, 31).

EMBRAPA - SNLCS / EPAMIG - DRNR. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do triângulo mineiro. EMBRAPA-SNLCS, Rio de Janeiro, 1982, 526p. (Boletim de Pesquisa, 1).

FEITOSA, C.T. Avaliação da disponibilidade do fósforo aplicado ao solo na forma de diferentes fosfatos. Piracicaba, 1978. 81p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

FERNANDES, S.B.V. & KAMINSKI, J. Efeito de níveis de acidulação do fosfato de araxá no suprimento de fósforo à sucessão sorgo-soja-areia, em dois solos. R. bras. Ci. Solo, 11:157-60, 1987.

FERREIRA, T.N. & KAMINSKI, J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais de patos de minas e gafsa puros e modificados por acidulação e calcinação. R. bras. Ci. Solo, 3:158-62, 1979.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.E.; SANTOS, H.L. & SANTOS, P.R.R.S. Adubação fosfatada para a cultura de soja baseada no fósforo "disponível" em diferentes extratores químicos e no fator "capacidade". R. bras. Ci. Solo, 3:105-11, 1979.

FREIRE, F.M.; BRAGA, J.M. & MARTINS FILHO, C.A.S. Valor fertilizante de fosfatos solúveis, araxá e parcialmente acidulado. R. bras. Ci. Solo, 7:65-8, 1983.

FRIESEN, D.K.; SALE, P.W.G. & BLAIR, G.J. Long-term greenhouse evaluation of partially acidulated phosphate rock fertilizers. I. Effect of acidulant and degree of acidulation on availability of P from two phosphate rocks. *Fertilizer Research*, 13:31-44, 1987.

GARGANTINI, H. & SANTOS, D. Competição de fertilizantes fosfatados em soja. *Bragantia*, 30:117-24, 1971.

GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Avaliação agronômica dos fosfatos em solo de cerrado. *R. bras. Ci. Solo*, 8:97-102, 1984.

GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. Avaliação preliminar da eficiência de fosfatos com acidulação parcial. *R. bras. Ci. Solo*, 10:75-80, 1986.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. *Solo de cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. São Paulo, Nobel, EMBRAPA/CPAC. p.129-66, 1987.

GOEDERT, W.J.; REIN, T.A. & SOUSA, D.M.G. Eficiência agronômica de um fosfato parcialmente acidulado em solo de cerrado. *R. bras. Ci. Solo*, 12:179-183, 1988.

GONÇALVES, J.L.M. Cinéticas de transformação de fósforo lábil em não lábil em amostras de solos de cerrado. Viçosa, 1988. 62p. (Mestrado - Universidade Federal de Viçosa).

GRANDE, M.A.; CURI, N. & QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina em solos cultivados com arroz irrigado. *R. bras. Ci. Solo*, 10:45-50, 1986.

- GUARDANI, R. & VALARELLI, J.V. Fosfato de patos de minas; estudos experimentais para sua utilização na indústria de fertilizantes. Fertilizantes, São Paulo, 6(1):1-10, 1984.
- HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H. & MOKWUNYE, A.U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. Adv. Agron., 40:89-140, 1986.
- HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil test in relation to phosphate buffering and labile phosphate in solis. Soil Sci. Soc. Am. J., 44(3):555-9, 1980.
- HUGHES, J.C. & GILKES, R.J. The effect of soil properties and level of fertilizer applications on the dissolution of Sechura rock phosphate in some soils from Brazil, Colombia, Australia and Nigeria. Australian J. of Soil Research, 24(2):219-27, 1986.
- KAMPRATH, E.J. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils. In: FERRI, M.G. Simpósio sobre o cerrado; bases para a utilização agropecuária, 4, Brasília, 1976. Anais. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1977. p.333-47.
- KANABO, I.A.K. & GILKES, R.J. The effect of particle size on North Caroline phosphate rock on its dissolution in soil and on levels of bicarbonate-soluble phosphorus. Fertilizer Research, 15:137-45, 1988.
- KHASAWNEH, F.E. & DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. Adv. Agron., 30:159-206, 1978.

- LANA, R.M.Q.; BRAGA, J.M.; RIBEIRO, A.C.; THIÉBAUT, J.T.L. & NEVES, J.C.L. Influência do tamanho da partícula de fosfato de araxá sobre a disponibilidade de fósforo para híbridos de sorgo. *Rev. Ceres*, 32(179):31-42, 1985.
- LOURENÇO, S. Adsorção e dessorção do fósforo em solos do estado do Paraná. Piracicaba, 1971. 69p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- MACHADO, R.P.; NOVAIS, R.F.; SEDIYAMA, C.S. & BORGES, A.C. Efeito da localização de doses de fósforo, em relação ao sistema radicular, sobre o comportamento de soja, com utilização de técnica de raízes subdivididas. *Rev. Ceres*, 30(170):295-307, 1983.
- MACKAY, A.D.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W. & GREGG, P.E.H. A simple model to describe the dissolution of phosphate rock in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50(2):291-6, 1986.
- MAGALHÃES, J.C.A.J. Efeito de níveis e modos de aplicação de fósforo na produção de matéria seca e conteúdo deste nutriente no milho (*Zea mays*, L.) cultivado em solos de cerrado, de Brasília - DF. Piracicaba, 1974. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- MASCARENHAS, H.A.A.; NEPTUNE, A.M.L.; MURAOKA, T.; BULISANI, E.A. & HIROCE, R. Absorção de nutrientes por cultivares de soja. *R. bras. Ci. Solo*, 4:92-6, 1980.
- MELLO, F.A.F.; ARTUR, V. & VICTORIA, R. Efeito de três adubos fosfatados sobre a acidez de um solo hidromórfico. *Rev. Agricultura*, 56(4):307-11, 1981.
- MOREIRA, J.F. Cinética de transformação de P lábil em não lábil no solo avaliada por análise química e crescimento de mudas de eucalipto. Viçosa, 1988. 52p. (Mestrado - Universidade de Viçosa).

- NOVAES, N.J. Efeito de fontes e doses de fósforo na cultura do capim gamba. Piracicaba, 1983. 103p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M. & MARTINS FILHO, C.A.S Efeito do tempo de incubação do fosfato de araxá em solos sobre o fósforo disponível. R. bras. Ci. Solo, 4:153-5, 1980.
- NOVAIS, R.F.; BAHIA FILHO, A.F.C.; RIBEIRO, A.C. & VASCONCELOS, C.A. Solubilização de fosfatos incubados com amostras de latossolo submetidas a diferentes números de revolvimento. R. bras. Ci. Solo, 9:23-26, 1985.
- NOVELINO, J.O.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; COSTA, L.V. & BARROS, N.F. Solubilização de fosfato de araxá, em diferentes tempos de incubação, com amostras de cinco Latossolos, na presença e na ausência de calagem. R. bras. Ci. Solo, 9:13-22, 1985.
- OLIVEIRA, H.F. Eficiência da resina trocadora de íons e de extratoras químicas para fósforo, comparados através de resposta biológica do painço. Piracicaba, 1986. 106p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- OSINAME, O.A. & SOBULO, R.A. Evaluation of three phosphorus sources for maize in Southwestern Nigeria. Trop. Agric., Trinidad, 62(1):33-7, 1985.
- PEDROSO NETO, J.C. & TANAKA, R.T. Comparação de fontes de fósforo aplicadas a lãço na cultura de soja. In: Memória da Reunião do Programa de Pesquisa de Soja no Estado de Minas Gerais. Uberaba, 1986. Memória. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988, p.139-141.

- RAIJ, B. & ZULLO, M.A.T. Método de análise do solo. Campinas, Instituto Agronômico, 1977. 16p. (Circular 63).
- RAIJ, B. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. bras. Ci. Solo, 2:1-9, 1978.
- RAIJ, B. The use of phosphates on main crops in Brazil. Phosphorus in Agriculture, 76:121-131, 1979.
- RAIJ, B. & DIEST, A. Phosphate supplying power of rock phosphate in an oxisol. Plant Soil, 55(1):97-104, 1980.
- RAIJ, B.; FEITOSA, C.T. & SILVA, N.M. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. Bragantia, 43(1):17-29, 1984.
- RAIJ, B.; SILVA, N.M.; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLINAZZI Jr, R.; DECHEN, A.R. & TRANI, P.E. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agronômico, 1985, 104p. (Boletim Técnico 100).
- RAIJ, B. Condições mínimas de eficiência para fosfatos alternativos ao superfosfato. R. bras. Ci. Solo, 10:235-9, 1986.
- RAIJ, B.; QUAGGIO, J.A. & SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. Commun. in Soil Sci. Plant Anal., 17(5):547-566, 1986.
- REHM, G.W. Response of irrigated soybeans to rate and placement of fertilizer phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J., 50(5):1227-30, 1986.

REZENDE, J.O. Capacidade de fixação do fósforo por solos dos estados da Bahia e Sergipe. Influência do pH e tempo de reação. Piracicaba, 1974. 81p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J. & RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980, p.263-310.

SFREDO, G.J.; BORKERT, C.M.; CORDEIRO, D.S.; PALHANO, J.B. & DITTRICH, R.C. Comparação de cinco extratores de fósforo do solo, considerando-se o tempo de incorporação de três adubos fosfatados. R. bras. Ci. Solo, 3:111-5, 1979.

SILVA, N.M.A. Efeito relativo do superfosfato triplo e do termofosfato sobre a produção e qualidade nutritiva do sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Piracicaba, 1987. 116p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).

SMYTH, T.J. & SANCHEZ, P.A. Phosphate rock and superphosphate combinations for soybeans in a cerrado oxisol. Agron. J., 74(4):730-5, 1982.

SOUSA, D.M.G. & VOLKWEISS, S.J. Rendimento de matéria seca e conteúdo de fósforo da parte aérea do milho influenciados pela adubação com superfosfato triplo em pó e em grânulos. R. bras. Ci. Solo, 11:127-32, 1987a.

SOUSA, D.M.G. & VOLKWEISS, S.J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solos. R. bras. Ci. Solo, 11:133-40, 1987b.

- SOUSA, D.M.G. & VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos no solo. R. bras. Ci. Solo, 11:141-6, 1987c.
- STEPHEN, R.C. The agronomic value of products resulting from the partial acidulation of North Carolina phosphate rock with phosphoric acid. Fertilizer Research, 8:67-73, 1985.
- SUAREZ, D. & IGUE, K. Efecto del tamaño de granos em la absorción de fosforo em suelos volcánicos. Turrialba, 24(2): 180-6, 1974.
- SYERS, J.K. & MACKAY, A.D. Reactions of Sechura phosphate rock and single superphosphate in soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 50(2):480-5, 1986.
- TANAKA, R.T. Disponibilidade de fósforo de fosfato de patos para a cultura do milho em Latossolo Roxo Distrófico sob condições de casa de vegetação. Lavras, 1978. 66p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura de Lavras).
- TANAKA, R.T.; BAHIA, V.G.; COELHO, A.M. & FREIRE, J.C. Seleção de extratores de fósforo do solo em função das respostas das plantas de milho e da adubação com fosfato de patos de minas em condições de casa de vegetação. R. bras. Ci. Solo, 5:38-42, 1981.
- TANAKA, R.T.; RESENDE, A.M.; SANTOS, P.R.R.S. & BRAGA, J.M. Fosfatos naturais de Minas Gerais associados a fosfato solúvel na produtividade de soja. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3., 1984. Campinas, 1984. Anais. Londrina, CNPSo/EMBRAPA, 1984a. p.709-20.

- TANAKA, R.T.; PEDROSO NETO, J.C. & REZENDE, A.M. Resposta da sucessão das culturas soja-trigo a níveis e formas de aplicação de fósforo. In: Memória da Reunião do Programa de Pesquisa de Soja no Estado de Minas Gerais. Uberaba, 1986. Memória. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988, p.135-138.
- TANAKA, R.T.; REZENDE, A.M. & SANTOS, P.R.R.S. Resposta da soja a níveis e métodos de aplicação de fósforo solúvel em solo sob vegetação de cerrado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 3., 1984. Campinas, 1984. Anais. Londrina, CNPSo/EMBRAPA, 1984b. p. 827-841.
- TRANI, P.E.; HIROCE, R. & BATAGLIA, O.C. Análise foliar: amostragem e interpretação. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 18p.
- TREMAIN, P.; SALE, P.W.G. & JESSOP, R.S. Effect of solubility of applied phosphate on the growth of narrow-leaved Lupin (*Lupinus angustifolius* L.) Fertilizer Research, 13:117-25, 1987.
- VOLKWEISS, S.J. & RAIJ, B. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: FERRI, M.G. Simpósio sobre o cerrado; bases para utilização agropecuária, 4., Brasília, 1976. Anais, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1977.
- YOST, R.; KAMPRATH, E.J.; NADERMAN, G.C. & LOBATO, E. Efeitos de níveis e métodos de aplicação de fósforo na produção de milho em um solo de cerrado do Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Anais. Campinas, 1975. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. p.303-7.

A P P E N D I C E

Apêndice 1. Valores de F da análise de variância dos parâmetros, produção de matéria seca da parte aérea das plantas de soja, concentração de fósforo e fósforo absorvido, em função dos cultivos.

Fontes de Variação	GL	1º Cultivo			2º Cultivo			3º Cultivo		
		M.S.	Conc. P	P. abs.	M.S.	Conc. P	P. abs.	M.S.	Conc. P	P. abs.
Tempo Incub.	3	9,50*	58,08*	20,10*	77,29*	1,07	27,94*	4,90*	5,32*	4,50*
Fontes de P	5	4,65*	11,93*	5,69*	192,82*	57,02*	153,87*	50,99*	44,47*	61,73*
Granulometria	2	9,75*	19,70*	12,47*	129,38*	38,61*	99,91*	31,92*	33,15*	35,29*
T x F	15	3,51*	5,08*	4,10*	6,08*	2,65*	3,49*	1,56	4,34*	1,05
T x G	6	0,65	2,89*	1,40	3,86*	1,80	0,76	2,33*	1,89	1,34
F x G	3	0,87	2,29	3,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CV (%)		20,1	7,8	28,9	11,9	11,6	17,3	17,2	8,1	21,0

* Significativo ao nível de probabilidade igual ou inferior a 5%.

Apêndice 2. Valores de F da análise de variância dos parâmetros, produção acumulada de matéria seca, fósforo absorvido e acumulado e seus respectivos índices de eficiência agronômica.

FV	GL	Produção de		Fósforo	
		Matéria Seca			
		Produção	IEA	Absorvido	IEA
Fontes	4	213,54*	211,46*	148,71*	126,97*
Granulometrias	1	43,46*	41,58*	17,28*	17,71*
F x G	4	6,42*	6,55*	2,97*	2,46
CV (%)		4,1	10,3	6,7	13,1
* Siginificativo ao nível de probabilidade igual ou inferior a 5%.					

Apêndice 3. Resumo da análise de variância dos parâmetros, produção de grãos, concentração de fósforo nas folhas e fósforo disponível no solo pelo método de H_2SO_4 - 0,05 N.

F. V.	GL	Produção	P (%)	$S_1^{a/}$	S_2	S_3	S_4	$ES_1^{b/}$	ES_2	ES_3	ES_4
Blocos	2	0,60	2,40	7,76*	2,80	0,04	0,14	4,77*	0,47	3,65	1,51
Lanco	3	39,30*	31,70*	0,55	3,12*	4,85*	2,99*	13,35*	23,25*	9,60*	26,84*
Sulco	3	16,26*	5,73*	43,21*	10,74*	13,49*	23,94*	0,02	0,11	1,83	1,18
L x S	9	2,62*	2,63*	1,36	0,72	1,00	1,74	0,56	1,53	1,11	0,45
Granul.	2	41,27*	33,66*	0,54	0,89	0,65	3,71*	11,35*	12,66*	9,64*	20,11*
G x L	1	0,00	0,00	2,01	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G x S	6	2,25	0,20	1,21	0,88	1,77	0,57	0,46	1,18	0,21	0,32

^{a/} Amostragem do solo no sulco de plantio em 4 épocas do cultivo da soja;

^{b/} Amostragem do solo entre os sulcos de plantio em 4 épocas do cultivo da soja;

* Valor de F significativo ao nível igual ou inferior a 5% de probabilidade

Apêndice 4. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo (média de granulado e pó) e da aplicação no sulco.

$$Y = 0,167 + 4,3 \times 10^{-4} \times L - 6,5 \times 10^{-7} \times L^2 + 1,5 \times S + 6,6 \times 10^{-7} \times S^2 - 3,9 \times 10^{-9} \times L \times S$$

$$R^2 = 0,854$$

Apêndice 5. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo pó a lanco e da aplicação na forma granulada no sulco.

$$Y = 0,167 + 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot L - 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot L^2 + 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot S - 2,0 \cdot 10^{-7} \cdot S^2 - 3,4 \cdot 10^{-7} \cdot L \cdot S$$

$$R^2 = 0,866$$

Apêndice 6. Teor de fósforo nas folhas de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo granulado a lanço e no sulco.

$$Y = 0,167 + 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot L - 7,4 \cdot 10^{-7} \cdot L^2 + 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot S + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot S^2 - 4,6 \cdot 10^{-7} \cdot L \cdot S$$

$$R^2 = 0,793$$

Apêndice 7. Produtividade de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo pó a lanço e da aplicação na forma granulada no sulco.

$$Y = 971 + 3,7 * L - 3,4 * 10^{-4} * L^2 + 2,8 * S + 0,026 * S^2 - 0,019 * L * S$$

$$R^2 = 0,939$$

Apêndice 8. Produtividade de soja - superfície de resposta à aplicação de superfosfato triplo granulado a lanço e no sulco.

$$Y = 1017 + 6,4 * L - 0,011 * L^2 + 2,3 * S + 0,021 * S^2 - 0,019 * L * S$$

$$R^2 = 0,895$$