DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA TRATADOS COM FERTILIZANTES FOSFATADOS

EDILSON CARVALHO BRASIL

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. TAKASHI MURAOKA

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

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Agosto - 1994

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLG/USP

Brasil, Edilson Carvalho

B823d Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. Piracicaba, 1994.

160p. ilus.

Diss.(Mestre) - ESALG Bibliografia.

1. Adubo fosfatado 2. Fósforo em solo - Disponibil<u>i</u> dade - Amazônia 3. Flanta - Nutrição I. Escola Sup<u>e</u> rior de Agricultura Luiz de Queiroz, Firacicaba

CDD 631.41

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA TRATADOS COM FERTILIZANTES FOSFATOS

EDILSON CARVALHO BRASIL

Aprovado em 16.09.1994

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Takashi Muraoka

Prof. Dr. Bernardo Van Raij

Prof. Dr. Salatiér Buzetti

CENA/USP

IAC

UNESP/Ilha Solteira

Prof. Dr. TAKASHI MURAOKA

Orientador

Este trabalho é dedicado:

À Franciane.

esposa carinhosa, amiga e companheira, que sempre esteve presente em todos os momentos de alegria e tristeza, de dificuldades e prazer, combinando instinto, equilíbrio e responsabilidade, em busca de uma vida cada vez melhor;

À Caroline,

que se fez presente no transcurso dessa caminhada, nos trazendo a alegria da semente que germina, e que em cada momento de sua existência, nos proporciona ansiedades, expectativas e acima de tudo, muito prazer, mostrando que na vida há objetivos que transcendem a nossa própria existência; e

Aos meus pais Marcílio e Madalena,

que com carinho, estímulo e dedicação conduziram-me para os ideais de honestidade e moral.

Aos meus irmãos

Edson, Marília, Mariza e Celso

ofereço

AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação.

À Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP) pela obtenção de novos ensinamentos e oportunidade oferecida.

Ao Dr. Takashi Muraoka pela orientação constante, apoio e amizade com que sempre me distinguiu.

Ao Dr. Bernardo Van Raij pela valiosa colaboração na discussão metodológica do trabalho.

Aos funcionários e amigos da Seção de Fertilidade do Solo (João O. Salvador, Marileuza A. B. Elias, Sandra P. Santos e Maria Aparecida Callegaro) e de Nutrição Mineral de Plantas (Henriqueta M. G. Fernandes) do CENA/USP pelo auxílio durante a realização das análises de laboratório e na execução deste trabalho.

Aos amigos Gilberto Ribeiro, Newton Falcão, Rivaldo dos Santos, Manoel Cravo e demais colegas do curso de Pós-graduação, pelo apoio, amizade e incentivo.

Ao colega Raimundo Freire de Oliveira, pesquisador do CPATU, pela colaboração e apoio dispensados na coleta e envio das amostras de solo para Piracicaba.

À FAPESP pelos recursos financeiros fornecidos para realização do trabalho.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

N.	Página
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xii
SUMMARY	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4.
2.1. O fósforo e sua dinâmica no solo	4
2.2. Reações dos fosfatos no solo	6
2.2.1. Reações de adsorção	7
2.2.2. Reações de precipitação	10
2.2.3. Isotermas de adsorção	13
2.3. Comportamento de fertilizantes fosfatados no solo	15
2.4. Disponibilidade de fósforo para as plantas	25
2.5. Avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas	27
2.5.1. Classificação dos extratores de fósforo do solo	30
2.5.2. Avaliação dos métodos de extração de fósforo do solo	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1. Coleta e preparo das amostras de solo	44
3.2. Caracterização física e química das amostras de solo	45
3.3. Análise química dos fosfatados	46
3.4. Capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos	48
3.5. Instalação e condução do experimento em casa de vegetação	48
3.6. Análise química do material vegetal	51

3.7. Extração e determinação de fósforo do solo	52
3.7.1. Extrator Mehlich - 1	52
3.7.2. Extrator Bray - I	52
3.7.3. Método da resina	52
3.7.4. Extrator Mehlich - 3	53
3.7.5. Método do papel de filtro (Pi)	54
3.8. Análises estatísticas	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1. Capacidade de adsorção de fósforo dos solos	56
4.2. Avaliação das fontes de fósforo	60
4.2.1. Comparação dos fosfatos utilizados	60
4.2.2. Curvas de resposta dos fosfatos	68
4.2.3. Eficiência agronômica dos fosfatos	75
4.3. Avaliação da eficiência dos extratores de fósforo do solo	80
4.3.1. Teores de fósforo nos solos	80
4.3.2. Correlação entre os teores de P-extraído e as respostas das	
plantas de caupi e arroz	88
4.3.2.1. Correlação entre o P-extraído pelos extratores e as	
respostas das plantas, considerando as fontes de	
fósforo	88
4.3.2.2. Correlação entre o P-extraído pelos extratores e as	
respostas das plantas, considerando os tipos de	
solos	95
4.3.2.3. Correlação geral entre o P-extraído pelos extratores	
e as respostas das plantas	101

5. CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICES	150

-

LISTA DE TABELAS

		Página
1.	Classificação e localização dos solos utilizados no trabalho	45
2.	Características físicas das amostras de solo (0-20cm).	46
3.	Caracterização química das amostras de solo (0 - 20 cm).	47
4.	Resultados da análise química dos fosfatos testados.	47
5.	Valores de adsorção máxima de fósforo (b), energia de adsorção (K)	,
	equações lineares de Langmuir e coeficientes de correlação, para os	5
	diferentes solos estudados.	56
6.	Relações entre as constantes b e K de Langmuir e algumas	S
	características dos solos estudados.	59
7.	Produção de matéria seca (g/vaso) da parte aérea de caupi e arroz, en	1
	resposta à aplicação de fontes de fósforo, nos diferentes solos testados.	62
8.	Conteúdo de fósforo absorvido (mg/vaso) da parte aérea de caupi	e
	arroz, em resposta à aplicação de fontes de fósforo, nos diferentes solo	s
	testados.	. 63
9.	Índice de eficiência agronômica (%) obtido através dos resultados de	e
	produção de matéria seca de plantas de caupi e arroz, em função de	e
	solos, fontes e doses.	. 77
10.	Índice de eficiência agronômica (%) obtido através do fósforo absorvido	0
	da parte aérea de caupi e arroz, em função de solos, fonte e doses	. 78
11.	Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostra	s
	de LA arg. coletadas antes da semeadura do caupi e arroz, em função	o
	das fontes de fósforo.	. 81

12.	Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras	
	de LA m.arg. coletadas antes da semeadura do caupi e arroz, em função	
	das fontes de fósforo.	82
13.	Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras	
	de LA m. coletadas antes da semeadura do caupi e arroz, em função das	
	fontes de fósforo	82
14.	Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras	
	de PV arg. coletadas antes da semeadura do caupi e arroz, em função	
	das fontes de fósforo.	83
15.	Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras	
	de PV m.arg. coletadas antes da semeadura do caupi e arroz, em função	
	das fontes de fósforo.	83
16.	Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas	
	das plantas de caupi, em matéria seca e P-absorvido, considerando as	S
٠	fontes de fósforo empregadas.	89
17.	Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas	
,	das plantas de arroz, em matéria seca e P-absorvido, considerando as	
	fontes de fósforo empregadas.	90
18.	Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas	
	das plantas de caupi, em matéria seca e P-absorvido, considerando os	
	solos utilizados.	96
19.	Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas	
	das plantas de arroz, em matéria seca e P-absorvido, considerando os	
	solos utilizados.	97

20. Correlação linear obtida entre as quantidades de	fósforo extraído pelos
diferentes extratores, em amostras coletadas a	ntes da semeadura do
caupi e do arroz.	113

LISTA DE FIGURAS

Isotermas de adsorção de fósforo para os solos estudados	E 77
isoternas de desergae de restoro para es seres estadades.	57
Isotermas de adsorção de Langmuir na forma linear, para os solos	
estudados	58
Produção de matéria seca da parte aérea de caupi obtida nos diferentes	
solos, em função das doses de fósforo.	67
P-absorvido da parte aérea de caupi obtido nos diferentes solos, em	
função das doses de fósforo.	67
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg	69
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg	69
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.	7 0
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV arg	70
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV m.arg	71
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg	72
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg	7 3
Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.	73
	estudados. Produção de matéria seca da parte aérea de caupi obtida nos diferentes solos, em função das doses de fósforo. P-absorvido da parte aérea de caupi obtido nos diferentes solos, em função das doses de fósforo. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV m.arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg. Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg.

13.	Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
	arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo PV arg	74
14.	Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de	
	arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo PV m.arg	74
15.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina	
	trocadora de íons e a produção de matéria seca de caupi.	101
16.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina	
	trocadora de íons e as quantidades de P-absorvido pelo caupi	102
17.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e a	
	produção de matéria seca de caupi.	102
18.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e as	
	quantidades de P-absorvido pelo caupi.	103
19.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e a	
	produção de matéria seca de caupi.	103
20.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e as	
	quantidades de P-absorvido pelo caupi.	104
21.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e a	
	produção de matéria seca de caupi.	104
22.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e as	
	quantidades de P-absorvido pelo caupi.	105
23.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina	
	trocadora de íons e a produção de matéria seca de arroz	106
24.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina	
	trocadora de íons e as quantidades de P-absorvido pelo arroz	107

25.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e a
	produção de matéria seca de arroz.
26.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e as
	quantidades de P-absorvido pelo arroz.
27.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e a
	produção de matéria seca de arroz.
28.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e as
	quantidades de P-absorvido pelo arroz.
29.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e a
	produção de matéria seca de arroz.
30.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e as
	quantidades de P-absorvido pelo arroz.
31.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método do papel de filtro
	(Pi) e a produção de matéria seca de arroz
32.	Correlação entre os teores de P-extraído pelo método do papel de filtro
	(Pi) e as quantidades de P-absorvido pelo arroz

xii

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS DA AMAZÔNIA

TRATADOS COM FERTILIZANTES FOSFATADOS

Autor: Edilson Carvalho Brasil

Orientador: Prof. Dr. Takashi Muraoka

RESUMO

Objetivando avaliar a disponibilidade de fósforo em amostras de

solos da Amazônia tratadas com fosfatos de diferentes solubilidades, bem como

avaliar a eficiência destes fosfatos, foi conduzido um experimento em vasos, em

casa de vegetação, utilizando-se cinco solos (LA-médio, LA-argiloso, LA-muito

argiloso, PV-argiloso e PV-muito argiloso), quatro fontes de fósforo (superfosfato

triplo, termofosfato yoorin-fino, termofosfato yoorin-granular e fosfato natural da

Carolina do Norte) em três doses (40, 80 e 120 µg P/g de solo) mais a

testemunha.

Plantas de caupi e arroz foram utilizadas como plantas-teste e as

produções de matéria seca e as quantidades de P-absorvido da parte aérea das

plantas foram correlacionadas com os teores de P do solo, extraídos pelos

métodos da resina trocadora de íons, Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-I e papel de

filtro (Pi) impregnado com óxido de ferro.

Paralelamente, realizou-se um ensaio para avaliar a capacidade

de adsorção de fósforo dos solos, utilizando-se a isoterma de Langmuir.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os melhores rendimentos em produção de matéria seca e P-absorvido foram obtidos nos solos tratados com superfosfato triplo.
- No cultivo do caupi, O termofosfato yoorin-fino apresentou Índice de Eficiência Agronômica superior aos obtidos pelo yoorin-granular e fosfato natural da Carolina do Norte, enquanto que no cultivo do arroz, os índices foram bastante semelhantes, para todos os fosfatos.
- O extrator Mehlich-1 extraiu altas quantidades de fósforo, nos tratamentos com fosfato natural da Carolina do Norte.
- Independentemente da fonte de fósforo utilizada, o extrator Mehlich-3 apresentou as melhores correlações com as respostas das plantas de caupi e arroz.
- Os extratores Mehlich-3 e Bray-I demonstraram possuir maior sensibilidade às variações de solo.
- O extrator Mehlich-3 destacou-se dos demais, mostrando-se mais adequado em predizer a disponibilidade de fósforo para as plantas, em diferentes condições de solos e fontes de fósforo.

PHOSPHORUS AVAILABILITY IN AMAZONIAN SOILS AMENDED WITH PHOSPHATE FERTILIZERS.

Author: Edilson Carvalho Brasil

Adviser: Prof. Dr. Takashi Muraoka

SUMMARY

With the objective of evaluating the phosphorus availability in

five Amazonian soils samples, amended with phosphates with different solubility,

and to evaluate the efficiency of these phosphates, a pot experiment was carried

out in greenhouse condictions. The soils utilized were: medium texture yellow

latosol, clayey yellow latosol, very clayey yellow latosol, clayey red-yellow

podzolic and very clayey red-yellow podzolic. Four phosphate sources were

tested (triple superphophate, fine yourin thermophosphate, granular yourin

thermophosphate and North Caroline rock phosphate) in three rates (40, 80 and

120 μg P/g soil) plus the control treatment.

Cowpea and rice plants were utilized as test-plants. Dry matter

yield and amount of P taken up by the plant were correlated with soil P

content, extracted by the following methods: anionic exchangeable resin.

Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-I and iron oxide-impregnated filter paper (Pi).

In addition, an assay to evaluate the P adsorption capacity of the

soils, using Langmuir isoterm adsorption, was also carried out.

The following conclusions were drawn:

- The best results on dry matter yield and P taken up, for cowpea, were obtained in soils amended with triple superphosphate.
- The agronomic efficiency index of fine yourin was superior to the granular yourin and North Caroline rock phosphate for the cowpea cultivation, while these indexes were similars on all the phosphates for the rice cultivation.
- The Mehlich-1 extractant extracted highest amount of phosphorus, in the treatments with North Caroline rock phosphate.
- Irrespective to the phosphate sources utilized, the Mehlich-3 extractant presented better correlation with the responses of cowpea and rice plants.
- The Mehlich-3 and Bray-I extractants showed to have higher sensibility to the soil variations.
- The Mehlich-3 extractant was outstanding over others, showing to be more suitable in predicting the P availability to the plants, in differents soil condictions and P sources.

1 - INTRODUÇÃO

A região Amazônica apresenta grande diversidade geológica que, aliada à elevada variação geomorfológica, caracteriza a existência de solos também bastante diversificados. Dentre as unidades taxonômicas existentes, merecem destaque os Latossolos e os solos Podzólicos Vermelho-Amarelo pela sua maior ocorrência na região.

Os Latossolos são os solos de maior importância para a região, por estarem localizados nas áreas de maior pressão de ocupação da terra e onde a agricultura é desenvolvida de forma mais intensiva. São representados pelo Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-amarelo e Latossolo Vermelho-escuro, com predominância do primeiro. São solos em avançado estágio de intemperização, normalmente ácidos e apresentam teores de argila variáveis, que possibilitam a diferenciação em Latossolos de textura média, argilosa e muito argilosa.

Um aspecto importante, que deve ser levado em consideração na incorporação desses solos ao processo produtivo, está relacionado à sua baixa fertilidade natural, pois aproximadamente 88% dos solos da Amazônia são caracterizados como pobres quimicamente (NASCIMENTO & HOMMA, 1984). Do ponto de vista da fertilidade do solo, os teores dos nutrientes destes solos são bastante reduzidos, sendo o fósforo o mais limitante para o desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, para a produção regional. Este nutriente destaca-se não somente pela sua importância no metabolismo das plantas, mas também pela

sua forte interação com o solo, atribuída principalmente aos processos de adsorsão e precipitação.

Nestes solos, em decorrência dos baixos teores de fósforo "assimilável" para as plantas e devido às necessidades de teores mais elevados pelas culturas, torna-se imprescindível o uso de fertilizantes fosfatados, dentre outros, para suprir as exigências das culturas, de forma a torná-las competitivas em termos de mercado.

A utilização racional e econômica de adubos fosfatados requer a compreensão da dinâmica do fósforo e de suas interações com o solo, bem como a determinação do teor "disponível" do elemento, objetivando diagnosticar as deficiências nutricionais das plantas e, consequentemente, indicar as práticas necessárias para corrigi-las, visando o máximo rendimento agrícola.

Geralmente, a disponibilidade de fósforo para as plantas é avaliada através de extração química do elemento no solo, pela utilização de métodos desenvolvidos estritamente com essa finalidade. Os diversos métodos utilizados na extração de fósforo do solo apresentam diferentes capacidades de extração e nem sempre se correlacionam bem com a quantidade absorvida pelas plantas. Os métodos de extração química são geralmente mais utilizados por serem rápidos, pouco onerosos e por possuírem maior praticidade na execução em rotina de laboratório.

O extrator Mehlich-1, comumente chamado de Carolina do Norte, é o método de extração de fósforo utilizado, genericamente, pela maioria dos laboratórios de solos da Amazônia, tendo sido introduzido nesta região sem nenhum estudo sobre a sua eficiência. Entretanto, este método tem sido considerado como um dos menos indicados para condições de solos argilosos e

principalmente onde houve aplicação de fosfatos naturais. Diversos outros métodos (Olsen, Bray-I, Bray-II, resina, Mehlich-3, Truog, Morgan, Valor E, Valor L, dentre outros) têm sido estudados nas mais variadas situações, apresentando resultados que também variam de acordo com as condições a que foram submetidos.

As peculiaridades existentes entre as diferentes regiões do país conferem também variações locais nas características de solo, indicando a necessidade de avaliações regionais de extratores de fósforo, sob condições que proporcionem alterações na capacidade de extração, bem como na eficiência dos extratores, visando predizer as quantidades do elemento que se encontram à disposição das culturas.

Os objetivos deste trabalho foram:

- Avaliar a disponibilidade de fósforo em amostras de solos da Amazônia tratadas com fosfatos de diferentes solubilidades, através da utilização de métodos de extração de fósforo do solo.
- Avaliar a eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados em diferentes solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O fósforo e sua dinâmica no solo

O fósforo no solo encontra-se, quase que exclusivamente, como ion ortofosfato, que é uma forma derivada do ácido ortofosfórico (H₃PO₄). Segundo FASSBENDER (1978), o fósforo no solo pode ser reunido em dois grandes grupos: orgânico e inorgânico.

Os compostos fosfatados orgânicos que ocorrem no solo encontram-se diretamente ligados à matéria orgânica e, conforme a estrutura química, são essencialmente de cinco tipos principais: fosfolipídios, fosfatos metabólicos, fosfoproteínas, ácidos nucléicos e inositol. De acordo com COSGROVE (1967), a natureza química da maior parte desses fosfatos orgânicos não são bem definidos.

Os fosfatos inorgânicos encontram-se em constante interação com os constituintes sólidos do solo, podendo-se distinguir formas químicas bem definidas e cristalizadas com outras pouco cristalizadas ou amorfas. Os fosfatos cristalinos encontram-se combinados principalmente com metais de cálcio, alumínio e ferro.

Dentre os fosfatos de cálcio, destacam-se o monocálcico-Ca(H₂PO₄)₂, dicálcico-CaHPO₄ e suas formas hidratadas, as apatitas hidroxidadas-Ca₅(PO₄)₃OH e suas variações fluoradas e carbonáticas. Entre os fosfatos de alumínio e ferro podem ser citados a variscita-AlPO₄.2H₂O, a vivianita-Fe₃(PO₄)₂.8H₂O e a estrengita-Fe₄PO₄.2H₂O. Há também a ocorrência de alguns fosfatos cristalinos mais complexos como as taranakitas, fosfatos octocálcicos, gorceixita e outros, que se originam de transformações de

fertilizantes adicionados ao solo. Os fosfatos amorfos são aqueles que se encontram adsorvidos ao complexo coloidal e os oclusos que possuem suas superfícies recobertas por hidróxidos de Fe, Al e Mn.

Nos solos tropicais, onde as condições de acidez são elevadas e com predomínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, as combinações de fósforo mais importantes são com ferro e alumínio (FASSBENDER, 1978), enquanto que em solos neutros ou alcalinos, o fósforo encontra-se mais ligado ao cálcio.

Na solução do solo, a abundância relativa das diferentes espécies do ácido ortofosfórico encontra-se diretamente relacionada com o pH e as suas formas podem dissociar-se de acordo com as reações apresentadas por LINDSAY (1979):

$$H_{3}PO_{4}$$
 \longrightarrow $H^{+} + H_{2}PO_{4}^{-}$ $\log K_{1} = -2,12$
 $H_{2}PO_{4}^{-}$ \longrightarrow $H^{+} + HPO_{4}^{-2}$ $\log K_{2} = -7,20$
 HPO_{4}^{-2} \longrightarrow $H^{+} + PO_{4}^{-3}$ $\log K_{3} = -12,33$

Em decorrência das reações de equilíbrio, a forma $H_2PO_4^-$ ocorre predominantemente na solução em condições de maior acidez, ou seja, na faixa de pH (3-6) que naturalmente ocorre nos solos tropicais. A forma HPO_4^{-2} ocorre em situações de pH mais elevado (acima de 7,0).

Em termos de nutrição de plantas, o fósforo no solo tem sido descrito, costumeiramente, em P-solução, P-lábil e P-não lábil, conforme o esquema proposto por LARSEN (1967):

Este modelo pressupõe que haja um equilíbrio rápido estabelecido entre o P-lábil e o P-solução, enquanto que a passagem de P-lábil para P-não lábil se dá de forma bastante lenta. Os teores de fósforo na solução do solo são geralmente baixos em decorrência da baixa solubilidade dos compostos de fósforo existentes e da alta capacidade de adsorção do elemento pelos constituintes sólidos do solo (RAIJ, 1991). O P-lábil é representado por formas meta-estáveis de compostos de fósforo ainda mal definidos. Esta forma pode ser determinada através da técnica de troca isotópica com ³²P (LARSEN, 1952). O P-não lábil é responsável pela maior parte do fósforo inorgânico do solo, sendo representado por compostos insolúveis que muito lentamente podem transformarse em formas lábeis (RAIJ, 1991).

Apesar deste conceito de compartimentalização das formas de fósforo no solo ser amplamente utilizado, OLSEN & KHASAWNEH (1980) consideram-o arbitrário pelo fato de que os limites entre os compartimentos existentes não podem ser precisamente delimitados.

2.2. Reações dos fosfatos no solo

Desde os tempos mais remotos a definição dos mecamismos usados para explicar a retenção de fósforo, envolveu precipitação e adsorção. Mais recentemente, pesquisadores têm proposto vários mecanismos mais afinados através dos quais o P pode ser retido pelo solo, onde incluem: adsorção física, quimisorção, troca aniônica, superfície da precipitação e precipitação dos constituintes sólidos do solo. Geralmente, todos esses mecanismos são casos especiais de reações de precipitação ou adsorção (SAMPLE et al., 1980).

WILD (1950) constatou, em sua revisão, que os hidróxidos de Fe e Al retêm grandes quantidades de P da solução, ocorrendo principalmente em solos ácidos. O autor menciona também, que outros aspectos interferem nas quantidades adsorvidas, como: tempo de reação, temperatura, pH e concentração de P na solução do solo.

O fósforo adicionado ao solo, geralmente, tem sua disponibilidade diminuída devido à reações com Ca, Al e Fe. Esses cátions podem fazer parte de compostos sobre os quais o fósforo é adsorvido ou podem estar contidos na solução do solo e reagir com o fósforo, formando precipitados pouco solúveis (THOMAS & PEASLEE, 1973). A reação do fósforo com esses metais pode se dar na solução do solo, com formação de precipitados ou pode ocorrer na superfície das partículas sólidas de argila, óxidos de Fe e Al ou de carbonato de cálcio, em solos calcários. A adsorção de fosfatos ao solo se estabelece através de ligações covalentes de alta energia, não possuindo relação com a troca iônica e por isso tem sido denominada de troca de ligantes (RAIJ, 1991).

2.2.1. Reações de adsorção

De modo geral, a retenção de P no solo tem sido estudada envolvendo constituintes específicos do solo, como hidróxidos de ferro e alumínio, minerais alumino-silicatados, carbonatos e até mesmo matéria orgânica.

De acordo com THOMAS & PEASLEE (1973), em solos ácidos os óxidos de Fe e Al e minerais de argila são os principais agentes promotores da adsorção de fósforo. Com o passar do tempo, o fosfato adsorvido, nestes

constituintes, pode ser recoberto por mais óxidos ou então tornam-se parte de um óxido cristalino.

Tentativas de explicar os mecanismos que envolvem a retenção de fósforo em solos têm sido realizadas por diversos pesquisadores, tendo em vista a distinção entre adsorção e precipitação (WILD, 1950). Apesar desses mecanismos não terem sido ainda totalmente elucidados, progressos nessa área têm sido obtidos nos últimos 20 anos (SAMPLE et al., 1980).

BACHE (1964) em estudos com óxidos puros, mediu a sorção de P pela gibbsita e hidróxido férrico, em soluções tamponadas à diferentes pH. O autor verificou que, segundo as curvas de adsorção, havia um mínimo de duas e as vezes três regiões de adsorção ocorrendo em diferentes concentrações de P na solução. O autor concluiu que os produtos precipitados provavelmente seriam (Al,Fe)(H₂PO₄)_n(OH)_{3-n} e ainda que os precipitados amorfos tinham muito maior solubilidade que variscita e estrengita.

Contudo, MULJADI et al. (1966a e 1966b), estudando a adsorção de P por caulinita, gibbsita e boemita, verificaram que as isotermas completas obtidas não comportavam um simples tipo de isoterma, o que levou os autores a dividir as isotermas de adsorção em três regiões, como foi feito por BACHE (1964). Resultados semelhantes foram obtidos por HSU & RENNIE (1962). MULJADI et al. (1966a e 1966b) sugeriram que as três regiões eram relacionadas à afinidade do P a três diferentes sítios, energicamente reativos. Os autores sugeriram ainda que, os mecanismos para adsorção nas regiões I e II eram de troca de fosfato por grupos OH, associados com um átomo de Al positivamente carregado, através da hidrólise dos grupos OH. Na região III pensou-se que a

adsorção se dava através da penetração de P dentro de algumas partes menos cristalinas da superfície das argilas.

Em termos práticos, LARSEN (1967) lembra que para solos intactos, somente são relevantes, nestes estudos, os aspectos levantados para regiões de baixa concentração de P. As regiões de maior concentração na solução são relevantes para solos que receberam aplicação de fertilizantes.

Com base no fato do pH da solução aumentar com o aumento da adsorção de P, RAJAN et al. (1974) desenvolveram um estudo para determinar quais grupamentos reagiam, quando o P era adsorvido à diferentes concentrações sobre a superfície de um hidróxido de Al. A quantidade de hidroxilas liberadas ou neutralizadas durante a adsorção de P foram medidas a pH constante. Os autores concluíram que, em baixas concentrações, o P substituiu principalmente grupamentos H₂O. Quando houve aumento da concentração de P, aumentando a adsorção, grupos OH eram envolvidos. Na adsorção máxima o P foi substituído, principalmente, por grupos OH.

WILD (1950) menciona numerosos trabalhos sobre reações de P com minerais de argila (alumino-silicato), onde foram verificadas variações apreciáveis nas quantidades de P, que foram retidas por diversos minerais. Todavia, quando comparou minerais com tamanhos de partícula aproximadamente iguais (área superficial), as quantidades de P retidas foram similares para montmorilonita e caulinita. Esse fato sugeriu ao autor, que os mecanismos para adsorção eram os mesmos para vários minerais de argila.

PISSARIDES et al. (1968) estudaram a adsorção de P por caulinita, ilita e montmorilonita saturadas com vários cátions. Sob baixa concentração de P a adsorção seguiu de acordo com a isoterma de adsorção de

Langmuir, para todos os cátions. Entretanto, argilas saturadas com íons divalentes adsorveram mais P que argilas saturadas com íons monovalentes. Isso levou os autores a concluírem que a espessura da dupla camada difusa controlou quanto de P foi adsorvido na superfície das argila.

Em função da similaridade nas isotermas de adsorção para alumino-silicatos e hidróxidos, vários pesquisadores têm concluído que os mecanismos de adsorção são os mesmos para os dois grupos de minerais (MULJADI et al. 1966a e 1966b; HINGSTON et al. 1972; KUO & LOTSE 1972; RAJAN & PERROT, 1975), diferindo apenas no número de sítios de adsorção.

Alguns autores têm sugerido um desarranjo na estrutura dos minerais silicatados de argila, à altas concentrações de P. LOW & BLACK (1948 e 1950) concluíram que, em elevadas concentrações, as soluções de P dissolvem a caulinita liberando Si e Al, com subseqüente precipitação de compostos Al-P. Resultados semelhantes foram verificados por RAJAN & FOX (1975), HASEMAN et al. (1950) e KITTRICH & JACKSON (1956).

Tem sido constatado também a ocorrência de adsorção em solos calcários, entretanto não será tratada nesta revisão, por não ser de ocorrência comum em regiões tropicais.

2.2.2. Reações de precipitação:

Os solos tropicais, geralmente, se apresentam associados a condições de baixo pH, grandes quantidades de hidróxidos de Al e Fe, e alta capacidade de retenção de P (FASSBENDER, 1978). Sob tais condições, os íons fosfato, que se liberam através da dissolução de fertilizantes fosfatados, são

instáveis e não permanecem em sua forma original, ficando sujeitos às transformações de adsorção e/ou precipitação.

Quando fertilizantes fosfatados são aplicados ao solo, sob a forma de grânulos altamente solúveis em água, como os superfosfatos, há a formação de uma solução ácida de ácido fosfórico, que reage com os diferentes cátions existentes na solução do solo (Ca, Al, Fe, principalmente), dando origem a precipitação de fosfatos cristalinos ou amorfos de Ca, Al e Fe, pouco solúveis (SAMPLE et al. 1980). Na maioria dos solos ácidos, os fosfatados de ferro são as formas de fósforo menos solúveis e mais estáveis no solo.

A caracterização dos fosfatos precipitados pode ser efetuada através de seus produtos de solubilidade e também pode-se diferenciá-los por extrações sucessivas com métodos analíticos adequados, como o desenvolvido por CHANG & JACKSON (1957). A avaliação desses compostos no solo, utilizando produtos de solubilidade ou atividade iônica, é amplamente discutido por LINDSAY & VLEK (1977) e LINDSAY (1979).

LOW & BACK (1948) foram os primeiros a demonstrarem que a adsorção de fosfatos pode ocasionar a formação de precipitados. Em uma reação de fosfato com caulinita, o mineral começou a dissolver-se após 4 dias, dando origem à novos produtos, em vez de fosfato adsorvido. Posteriormente, HASEMAN et al. (1950) descobriram que um grande número de fosfatos cristalinos poderiam ser identificados, quando soluções concentradas de fósforo eram colocadas em contato com os solos.

LINDSAY & STEPHENSON (1959), estudando as reações de fosfatos monocálcicos no solo, verificaram que houve a formação de uma solução com pH de 1,0 a 1,5 que dissolveu quase todos minerais do solo que entraram em

contato. Alumínio e ferro foram os primeiros a serem liberados na solução e subsequentemente foram reprecipitados como fosfatos de Al e Fe, enquanto que o Ca tendeu a formar fosfato dicálcio (CaHPO₄) e fosfato de cálcio básico (Ca-P). TAYLOR & GURNEY (1965) verificaram que, quando o potássio entra na reação, pode haver a formação de compostos semelhantes a taranakita (Al, K, OH, H₂PO₄). Os autores sugeriram que, com o tempo, os produtos que tinham sido formados, foram tornando-se menos solúveis.

Em estudos sobre a reação de fertilizantes fosfatados com o solo, LINDSAY et al. (1962) reconheceram 32 diferentes compostos de fósforo, precipitados a partir de soluções de fosfatos monocálcicos, dicálcicos, monoamônico, diamônico, monopotássico e dipotássico. A natureza dos produtos da reação do fósforo no solo dependeu, sobretudo, das condições de acidez durante a dissolução do fertilizante.

A capacidade de fixação de fósforo dos solos pode ser influenciada pelo conteúdo de matéria orgânica, hidróxidos livres de alumínio e ferro, minerais de argila existentes, pH, cátions presentes no sistema e pelo tipo de fertilizante empregado (SMITH, 1968). Os fatores mais importantes são pH e conteúdo de hidróxidos livres de ferro e alumínio (FASSBENDER, 1978). A participação da M.O. no processo de adsorção ainda é discutível, pois os resultados de trabalhos sobre este assunto são bastante controversos. VOLKWEISS & RAIJ (1977) relatam que a M.O. pré-sorvida sobre os óxidos hidratados pode atuar na redução da retenção de P dos solos, pelo bloqueio dos sítios de adsorção.

2.2.3. Isotermas de adsorção

A representação matemática dos mecanismos de adsorção e precipitação tem sido realizada através de isotermas de adsorção, que tentam dimensionar a magnitude dos sistemas de adsorção de fósforo, pelo ajuste dos dados a modelos de isotermas descritos previamente.

Isotermas de adsorção descrevem convenientemente e quantitativamente a adsorção de solutos à superfície de sólidos, sob condições constantes de temperatura e pressão, mostrando a quantidade de adsorvato sorvido em função de uma concentração de equilíbrio (BOHN et al., 1985).

Em princípio, essa técnica é bastante simples, tendo sido usada para descrever a adsorção de P e propor os mecanismos de ligação em amplo número de solos e minerais (OLSEN & KHASAWNEH, 1980; SAMPLE et al., 1980). Consiste, basicamente, em adicionar uma quantidade conhecida de adsorvato a uma solução contendo quantidades também conhecidas de adsorvente. Admite-se que, todo adsorvato removido da solução em equilíbrio, represente a quantidade adsorvida. Um aspecto importante é que as condições de equilíbrio sejam mantidas e reações secundárias, tais como precipitação, devam ser reduzidas (BOHN et al., 1985).

As equações de Languir, Freundlich e Brunauer-Emmett-Teller (BET) são geralmente utilizadas para descrever dados de adsorção. A isoterma de Freundlich foi provavelmente usada pela primeira vez por RUSSEL & PRESCOTT em 1916 (SAMPLE et al. 1980), tendo sido deduzida empiricamente e contendo constantes que não possuem um significado físico (LARSEN, 1967). Contudo, alguns trabalhos mencionam que a equação de Freundlich tem apresentado resultados coerentes com as características de

adsorção de P no solo (BARROW, 1978; OLSEN & KHASAWNEH, 1980; NOVAIS, 1977; MOURA FILHO, 1990).

A isoterma de Languir foi inicialmente deduzida para descrever a adsorção de gases sobre superficies sólidas, baseada nos seguintes pressupostos: (I) a energia de adsorção é constante para todos os sítios e independe da extensão da superficie coberta; (II) a adsorção se dá em sítios específicos, não havendo interação entre as moléculas adsorvidas; (III) a adsorção máxima possível corresponde a uma completa camada monomolecular formada sobre a superficie do adsorvente. A forma geral da equação de langmuir é dada pela seguinte expressão:

$$x/m = (KCb/(1 + KC))$$

Onde x/m é a quantidade do elemento adsorvido; C é a concentração de equilíbrio do elemento na solução; b é a quantidade máxima do elemento adsorvido; e K é uma constante relacionada à energia de adsorção do solo. Esta equação tem sido mais utilizada na forma linear:

$$C/x/m = (1/Kb) + (C/b)$$

A isoterma de Langmuir tem sido preferida em relação à de Freundlich, por permitir estimar a constante relacionada a energia de adsorção dos solos e a capacidade máxima de adsorção do elemento. OLSEN & WATANABE (1957) foram os primeiros a aplicar a isoterma de Langmuir para descrever a adsorção de fósforo no solo, tendo seu uso generalizado a partir de então

(FASSBENDER, 1966b; SYERS et al., 1973; BRAGA, 1979; BITTENCOURT & ZAMBELO, 1975b; ALVAREZ, 1982).

2.3. Comportamento de fertilizantes fosfatados no solo

Estudos em regiões temperadas evidenciam que os fertilizantes fosfatados devem possuir pelo menos 40 a 50% de fósforo solúvel em água, para assegurar um suprimento adequado nas fases iniciais de crescimento das plantas (ENGLESTAD, 1972¹ citado por SANCHEZ, 1981). Este requisito pode ser plenamente satisfeito pelos superfosfatos (simples e triplo), que teoricamente poderiam ser efetivamente utilizados somente em solos com baixa à moderada capacidade de retenção de fósforo (SANCHEZ, 1981).

O uso de fertilizantes fosfatados reveste-se de grande importância para os solos brasileiros, onde a quase totalidade dos cultivos responde favoravelmente à adubação (RAIJ et al., 1981). Os fertilizantes fosfatados mais usados na agricultura brasileira são os fosfatos solúveis em água (superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato monoamônio, e fosfato diamônio), que, seguramente, são as melhores fontes de fósforo. Contudo, são produtos caros, por exigirem em sua fabricação alto consumo de energia, além de necessitarem de enxofre, matéria prima importada que eleva ainda mais o custo final do produto (RAIJ et al., 1982).

¹ ENGLESTAD, O. P. Fertilizers. In: Soil of the humid tropics. Washington, National Academy of Science, 1972. p.174-88.

A utilização de rochas fosfatadas concentradas e finamente moídas tem sido sugerida como forma de solucionar a deficiência de fósforo para muitos dos solos brasileiros. Em função de exigirem processos industriais mais simplis e, consequentemente, baixo custo de fabricação, o emprego desses fosfatos tem sido considerado como uma alternativa acessível para os agricultores. Entretanto, essa expectativa nem sempre é alcançada, fazendo com que o emprego direto dos fosfatos naturais na agricultura brasileira seja bastante limitado.

A utilização de fosfatos naturais como fonte de fósforo para as plantas é uma prática empregada, durante muitos anos. Apesar disso, a aplicação direta de rocha fosfatada na agricultura, ainda representa um baixo percentual em relação aos demais fertilizantes fosfatados.

Os fosfatos naturais brasileiros têm mostrado baixa eficiência inicial em relação ao superfosfato triplo, melhorando com o decorrer do tempo (RAIJ et al., 1982). Além da baixa eficiência dos fosfatos naturais apatíticos, diversos autores têm demonstrado a grande variação dos resultados experimentais desses produtos, como fonte de fósforo para as culturas (DYNIA, 1977; FEITOSA et al., 1978; KORNDORFER, 1978; RAIJ & DIEST, 1980; ALCARDE & PONCHIO, 1980; BRAGA et al., 1980; CABALLA & WILD, 1982; GOEDERT & LOBATO, 1980).

As características de lenta solubilização dos fosfatos naturais requerem uma avaliação a longo prazo. GOEDERT (1983), estudando o efeito residual de alguns fosfatos, após 5 anos de incorporação ao solo, verificou que cerca de 20 à 25% de fósforo ainda se encontrava na forma de apatita. Através de extração do P com resina foi possível, o autor, constatar que o efeito residual do fosfato de Patos de Minas foi semelhante ao superfosfato triplo após o quinto ano.

Geralmente, os resultados experimentais têm mostrado que os fosfatos de rocha são mais efetivos quando usados em solos ácidos e deficientes em fósforo (KHASAWNEH & DOLL, 1978). De acordo com GOEDERT et al. (1987) pode-se esperar que os fosfatos naturais de origem apatítica, como é o caso da maioria dos fosfatos brasileiros, apresentem maior solubilidade em condições de solos ácidos com baixos teores de cálcio trocável.

KHASAWNEH & DOLL (1978) justificam que a influência do pH sobre a dissolução dos fosfatos de rocha tem sido interpretada como um simples efeito de pH, onde a acidez é o agente responsável pelo aumento da disponibilidade de fósforo, oriundo dos fosfatos. Segundo os autores, a dissolução dos fosfatos naturais é afetada não somente pelo desenvolvimento da acidez do solo, mas também juntamente com outras condições, tais como; baixos teores de Ca-trocável e alto de Al-trocável.

GOEDERT & LOBATO (1980), estudando a eficiência agronômica de onze fosfatos, em Latossolo Vermelho-escuro do cerrado, verificaram que a eficiência dos fosfatos naturais foi maior com o aumento da acidez do solo. BLANCO et al. (1965), estudando o comportamento de fertilizantes fosfatados em diferentes condições de acidez do solo, observaram que na faixa de pH 4,7 a 5,0 houve melhor aproveitamento das fontes. Quando a calagem promoveu a elevação do pH acima de 5,5, constatou-se diminuição da eficiência dos fosfatos utilizados. DYNIA (1977), usando solos com diferentes pH e capacidades de retenção do fósforo, verificou que a eficiência do fosfato de Gafsa foi maior quando aplicado em solos com alto teor de argila e pH inferior a 6,0.

JUO & KANG (1978) trabalhando com ultisols do oeste da África, observaram que o efeito do baixo pH na dissolução dos fosfatos e suprimento de fósforo para as culturas foi mais pronunciado nos fosfatos de maior reatividade, como o fosfato da Carolina do Norte. Entretanto, VAN DER PAAUW (1965) menciona que, muito embora o pH tenha melhorado a eficiência do fosfato de Gafsa, os valores de pH, que proporcionaram a maior eficiência, são muito baixos para o ótimo desenvolvimento da maioria das culturas.

RUSSEL (1973) afirma que o valor fertilizante dos fosfatos de rocha é equivocado, pois, muitas vezes é ineficiente em solos ácidos com culturas, para as quais espera-se ser adequado. Conforme o autor, é um fertilizante de valor muito limitado para a agricultura intensiva, em zonas temperadas, já que, não pode manter uma concentração de fósforo suficientemente alta na solução do solo, para altas produções de culturas com grandes demandas iniciais do elemento. Pode, entretanto, ser adequado para muitos solos ácidos em sistemas de agricultura tropical, onde não são esperadas produções elevadas, por ser uma fonte de fósforo de baixo custo. KHASAWNEH & DOLL (1978) sustentam, no entanto, que muitas das confusões e divergências de opiniões com respeito à eficiência dos fosfatos de rocha, poderiam ser resolvidas se fossem consideradas as diferenças na composição química e mineralógica dos fosfatos, e se os fatores que afetam a dissolução dos mesmos no solo fossem quantificados. Ainda que esses aspectos dos fosfatos de rocha sejam importantes, sua eficiência em solos específicos pode ser amplamente determinada por três fatores do solo: pH, concentração de fósforo e de cálcio na solução do solo.

Em solos ácidos com elevada capacidade de fixação, como é o caso dos solos da Amazônia, a aplicação de fontes de fósforo com menor

solubilidade, pode ser economicamente mais eficiente que as fontes solúveis (SANCHES, 1981), sendo desejável o uso de rocha fosfatada de alta qualidade.

O fosfato natural da Carolina do Norte, uma fluorapatita, tem sido considerado como um produto de elevada solubilidade (HAMMOND et al., 1986) e com alta eficiência agronômica (CHIEN & HAMMOND, 1978; LEÓN et al., 1986). Resultados experimentais de campo, relatados por HAMMOND et al. (1982) e LEÓN & HAMMOND (1984), demonstraram que a aplicação do fosfato natural da Carolina do Norte, moído, proporcionou os mais altos rendimentos de *Brachiaria decumbens* e de feijão, quando comparados com fosfatos de rocha do Peru (Fosbayovar), Colômbia (Huita e Pesca), Tunez (Gafsa) e Estados Unidos (Flórida e Tennessee).

LEÓN et al. (1986), avaliando o potencial agronômico de fosfatos de rocha do Brasil (Abaeté, Araxá, Tapira, Catalão, Jacupiranga e Patos de Minas), da Colômbia (Huila, Pesca e Sardinata), do Peru (Bayovar) e da Venezuela (Lobatera), em relação ao superfosfato triplo, demonstraram que a eficiência agronômica do fosfato da Carolina do Norte foi maior que os demais fosfatos estudados. Os autores, com base na solubilidade dos fosfatos, medida por quatro métodos de laboratório, e na resposta de *Panicum maximum*, classificaram a reatividade dos fosfatos de rocha usados, em: alta (Carolina do Norte e Bayovar); média (Huila e Pesca); baixa (Sardinata, Patos de Minas, Lobatera, Araxá e Abaeté); e muito baixa (Catalão, Jacupiranga e Tapira).

Estudos têm demonstrado que o fosfato de Carolina do Norte possui significante solubilidade em solos ácidos e esse comportamento tem sido atribuído ao enfraquecimento da estrutura cristalina da apatita, devido à substituição isomórfica do fosfato pelo carbonato, resultando no aumento da

solubilidade do fosfato, em faixas de pH ácidos (CHIEN & BLACK, 1976; SMITH & LEHR, 1966). CHIEN (1977) verificou que este fosfato apresentou maior solubilidade em acetato de amônio 1N pH 4,8, que os fosfatos da Flórida e Tenesee, atribuindo esse efeito à maior substituição isomórfica do fosfato pelo carbonato. O grau desta substituição na estrutura da apatita tem sido citada como o fator determinante da reatividade química das rochas fosfatadas (HAMMOND et al., 1986).

Normalmente, a escolha de uma fonte de fósforo está relacionada, tanto à sua eficiência em suprir as necessidades das plantas, como ao valor real do fertilizante. Outros aspectos podem ser considerados na escolha, como: fornecimento de outros nutrientes, correção da acidez do solo e promoção de maior desenvolvimento radicular.

No Brasil, a escolha do fertilizante fosfatado mais adequado para determinada cultura, não deveria ser baseada somente nas características técnicas dos diferentes produtos existentes. Considerando apenas este aspecto, os fertilizantes caracterizados como altamente solúveis e de maior concentração de fósforo, ficam favorecidos. Considerando, entretanto, as condições existentes nas diferentes regiões do país, a decisão deveria basear-se também em outros atributos de vital significância, como: fornecimento de outros nutrientes e correção de acidez.

Do ponto de vista tecnológico, os processos convencionais de produção de fertilizantes fosfatados, por "via úmida", são bastante exigentes quanto aos teores de impurezas aceitáveis, acarretando uma diminuição nas taxas de recuperação de P₂O₅ das jazidas. A busca de soluções alternativas que

permitam o aproveitamento mais racional das reservas de rochas fosfáticas, representa um aspecto importante para agricultura brasileira.

FENSTER & LÉON (1978)², citados por KAMINSKI (1983), indicaram os termofosfatos, especialmente os termofosfatos magnesianos fundidos, como alternativa de grande potencial para solos da América Latina, relatando que estes fosfatos mostraram-se até superiores aos superfosfatos, inclusive quanto a absorção de Ca e Mg..

Há vários processos que preconizam o aquecimento de misturas de rocha fosfática com outros reagentes, para obtenção de fertilizantes que proporcionem satisfatória disponibilidade de fósforo para as culturas. De acordo com BIXBY (1980), esses processos podem ser separados em três categorias gerais: (i) aqueles baseados nas reações químicas entre o fosfato e um sal alcalino ou silicato de magnésio; (ii) aqueles baseados na remoção do fluoreto por volatilização; e (iii) aqueles processos em forno elétrico baseados na acidulação em altas temperaturas, com silício, em presença de carbono, usado como agente redutor.

Sem dúvida, a produção de termofosfatos é uma das melhores alternativas, uma vez que este processo tecnológico não apresenta restrições quanto a pureza da matéria-prima empregada. Além disso, deve-se considerar que o processamento do termofosfato é baseado em insumos nacionais de grande

² FENSTER, W.E. & LEON, L.A. Utilization of phosphate rock in tropical soils of Latin America. In:

International Fertilizer Development Center (ed.). Seminar on phosphate rock for direct
aplication. Haifa, Israel, 1978. p.174-210.

disponibilidade, não dependendo da importação de enxofre, matéria-prima básica para a indústria dos fertilizantes fosfatados convencionais.

Os termofosfatos são produtos resultantes de tratamento térmico de rochas fosfatadas com ou sem adição de outros materiais (MALAVOLTA e ROMER, 1975). O tratamento térmico consiste na calcinação (termofosfatos calcinados) ou na fusão (termofosfatos fundidos). Esses fertilizantes caracterizamse por possuírem alta solubilidade em solução de ácido cítrico, e solução neutra de citrato de amônio, são insolúveis em água e apresentam comportamento alcalino (ALCARDE & PONCHIO, 1980).

O termofosfato magnesiano fundido é uma mistura de rocha fosfatada com outros materiais, fontes de sílica e magnésio, fundidos em forno elétrico, à temperaturas da ordem de 1400 a 1500°C. Estes outros materiais podem ser escórias, resultantes da produção de ferro-níquel, ou rochas magnesianas, como o serpentinito, que é constituído por silicato hidratado de magnésio (GUARDINI, 1987). A adição de silicato de magnésio natural, que contém ferro, tem por finalidade baixar o ponto de fusão da mistura e facilitar a formação de materiais vítreos, onde o fósforo se apresenta numa forma solúvel em ácido cítrico (GUARDINI et al., 1983).

De acordo com revisão apresentada por GOEDERT et al. (1986a), em termos agronômicos, os termofosfatos têm apresentado eficiência similar ou mesmo superior à dos superfosfatos. Além de fornecer cálcio e magnésio para as plantas, face seu alto teor de silicato de cálcio e magnésio, tem mostrado um efeito corretivo da acidez do solo (LOBATO, 1982; YOST et al., 1982; GOEDERT & LOBATO, 1984; GOEDERT et al., 1986a).

KORNDORFER (1978), trabalhando com dois solos de diferentes características, numa sucessão de quatro cultivos, verificou que a eficiência do termofosfato magnesiano (yoorin) foi similar ao superfosfato triplo.

MUZILLI et al. (1971) compararam o efeito de doses crescentes de termofosfato magnesiano, de fosfato de Rhenania e do superfosfato simples em solos ácidos do Paraná, com elevada saturação de alumínio trocável. Os resultados demonstraram que o termofosfato magnesiano apresentou o melhor efeito na neutralização da acidez, sendo sua eficiência inferior a do fosfato Rhenania e superior ao superfosfato simples.

GOEDERT et al. (1990) avaliaram, durante quatro anos, 18 fosfatos produzidos a partir de concentrados fosfáticos de Araxá, Patos de Minas, Tapira, Catalão e Anitápolis, sendo aplicados na cultura da soja "in natura", parcialmente solubilizados e tratados termicamente. No primeiro ano, a eficiência relativa dos termofosfatos, produzidos a partir do concentrado de Patos de Minas, foi superior à do superfosfato triplo. Além de refletirem a disponibilidade de fósforo destes produtos, os resultados foram também atribuídos aos efeitos nutricionais e corretivos dos silicatos de cálcio e magnésio, presentes neste materiais. Nos anos subsequentes, a eficiência destes produtos diminuiu, porém foi semelhante à dos superfosfatos. Segundo os autores, os resultados confirmam o potencial do tratamento térmico para a produção de fertilizantes fosfatados, mesmo a partir de concentrados fosfáticos de baixa qualidade.

Além da boa qualidade desejável para fertilizantes fosfatados, algumas alterações na característica física do próprio produto podem melhorar marcantemente a eficiência agronômica dos mesmos. A granulometria é uma das características físicas dos adubos fosfatados, que pode influenciar sensivelmente

na disponibilidade dos fosfatos aplicados ao solo, possuindo uma atuação específica de acordo com o tipo de produto empregado.

Em estudos com dois solos de alta capacidade de fixação de fósforo, SUARES & LIGUE (1974) verificaram que o aumento do diâmetro dos grânulos de superfosfato concentrado, proporcionou maior absorção de P por plantas de milho, promovendo também aumento no efeito residual do cultivo subseqüente. Resultados semelhantes foram também obtidos por SOUSA & VOLKWEISS (1987a e 1987b). GOEDERT et al. (1987) indicam o uso de superfosfato granulado como forma de minimizar a fixação de fósforo em solos ácidos.

Efeito inverso tem sido verificado para diferentes fosfatos de rocha (NOVAES, 1983; STEPHEN, 1985; KANABO & GILKES, 1988; LANA et al., 1985; RAIJ et al., 1979), onde a redução do tamanho das partículas tem favorecido o aumento da eficiência desses materiais, em função do aumento na superfície de exposição e conseqüente aumento da solubilidade. VASCONCELOS et al. (1986) verificaram que a eficiência das fontes fosfatadas foi dependente do nível de P₂O₅, da granulometria e do teor de P₂O₅ total e solúvel em água.

Poucos estudos foram realizados sobre a influência da granulometria dos termofosfatos na sua eficiência agronômica. Mesmo os poucos trabalhos existentes indicam a necessidade de melhores estudos em virtude dos resultados divergentes apresentados.

Em estudo sobre a eficiência agronômica de diversos fertilizantes fosfatados, TANAKA (1990) verificou que a granulação do termofosfato sílico-magnesiano aumentou sistematicamente a sua eficiência

agronômica. SILVA (1987) não observou diferença significativa na produção de matéria seca e nas qualidades nutricionais do sorgo sacarino, entre os termofosfatos denominados "acabado" (75% das partículas passam na peneira ABNT-100), "semi-acabado" (100% das partículas passam na peneira ABNT-20) e o "grosso" (50% passam em peneira ABNT-20). Por outro lado, STEFANUTTI (1991), estudando o efeito da granulometria de um termofosfato magnesiano no aproveitamento do fósforo, verificou que o produto com partículas de maior tamanho foi menos eficiente que a forma em pó.

2. 4. Disponibilidade de fósforo para as plantas.

A disponibilidade ótima de um nutriente para uma fase qualquer de crescimento da planta, requer a manutenção adequada no suprimento de formas assimiláveis, na superfície das raízes. Isso envolve a mobilização de formas lábeis do nutriente, adsorvidas sobre a superfície das partículas do solo; a dissolução de formas precipitadas e a mineralização de formas orgânicas, com subsequente transporte para as proximidades das raízes (COREY, 1990). GUNARY & SUTTON (1967) representaram o suprimento de fósforo do solo para as plantas, de acordo com o esquema:

Conforme este esquema, o fósforo inorgânico na solução do solo encontra-se em equilíbrio dinâmico com fosfatos da fase sólida, que estão adsorvidos ou principalmente combinados em compostos de cálcio, alumínio e ferro. As plantas absorvem fósforo principalmente da solução do solo, e como a concentração de fosfatos inorgânicos existentes nesta fase é normalmente muito baixa, no período de crescimento de uma cultura anual, o solo necessita tornar disponível centenas de vezes a quantidade de fósforo na solução, em um determinado momento (RAIJ, 1978).

As condições desejáveis do estado do fósforo no solo para atender as exigências das culturas, implicam em satisfazer as condições dos fatores primários mencionados por GUNARY & SUTTON (1967): a) fator quantidade-Q ou a reserva de fósforo no solo; b) fator intensidade-I, representado pelo elemento na solução do solo; c) fator capacidade-C, que reflete a habilidade do solo em manter um nível de fósforo em solução; e d) fator difusão-D, que representa a difusividade do elemento no solo.

O fator capacidade representa a habilidade do solo em manter o parâmetro intensidade, pela variação do parâmetro quantidade e pela adição ou remoção de fósforo no solo (RAIJ, 1978). De acordo com BECKETT & WHITE (1964), o fator capacidade pode ser definido pela relação Q/I e tem sido também denominado de poder tampão potencial.

A avaliação da disponibilidade de fósforo em solos regularmente adubados é discutida por RAIJ (1991). Fosfatos adicionados ao solo, através de fertilizantes, dissolvem-se passando para a solução do solo. Devido à baixa solubilidade dos compostos de fósforo formados e à forte tendência de adsorção pelo solo, a maior parte do elemento passa para a fase

sólida, onde fica em parte como P-lábil, passando gradualmente para fosfato não lábil. O P-lábil pode redissolver-se, caso haja abaixamento do teor em solução, para manutenção do equilíbrio. Esse abaixamento ocorre, principalmente, por absorção pelas plantas. Devido aos baixos teores de P existentes na maioria dos solos, a lixiviação do elemento nas águas de percolação é mínima.

2.5. Avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas.

Os parâmetros descritos por GUNARY & SUTTON (1967) podem ser estimados, mas a metodologia é dificil para uso rotineiro em análises de terra. Do ponto de vista prático, a determinação desses fatores ou mesmo a definição operacional, em termos de uma metodologia exequível para análise do solo em laboratório, esbarra em barreiras de dificil transposição (RAIJ, 1987). Contudo, o fator quantidade tem sido o mais fácil de avaliar, existindo métodos satisfatórios para determinar a disponibilidade de fósforo em solos.

De acordo com LARSEN (1967), a determinação de fósforo no solo, como uma fonte de nutrientes para as plantas, deveria fundamentalmente basear-se no comportamento do fósforo no solo. O autor menciona, que os fatores intensidade e capacidade podem juntos descrever o suprimento de fósforo com considerável precisão. Uma forma de avaliar o fator intensidade é através da concentração do elemento na solução do solo, que, entretanto, é bastante complicada.

A determinação do fator intensidade, introduzida inicialmente por SCHOFIELD (1955), dava uma idéia do potencial químico de fosfato monocálcico, sendo calculado a partir da determinação de P em solução de CaCl₂

0,01M. Contudo, WILD (1964) demonstrou que para a absorção das plantas, a concentração de P em solução, geralmente expressa uma medida melhor que o potencial químico de P do solo. O fator capacidade pode ser mensurado através da análise de diluição isotópica (LARSEN,1967).

O conceito de disponibilidade de um elemento foi proposto, inicialmente, por BRAY (1947), envolvendo a relação entre a quantidade de um nutriente no solo, em determinado momento, e o crescimento vegetal. De acordo com o autor, uma análise de solo para ser considerada como bom instrumento de avaliação da disponibilidade de um nutriente, deve atender a três critérios: (I) o extrator deve extrair proporcionalmente ou totalmente a fração ou forma do nutriente considerado disponível, em solos com diferentes propriedades; (II) a quantidade extraída deve ser medida com rapidez e precisão razoável; e (III) a quantidade extraída deve ser correlacionada com o crescimento e a resposta da cultura ao nutriente, sob condições diversas. Não há dúvida, quanto a existência de uma relação entre o estado do nutriente no solo e o crescimento das plantas. Essa relação, entretanto, é freqüentemente obscura e influenciada por diversos fatores.

Segundo KAMPRATH & WATSON (1980), os objetivos básicos das análises de solo, para diagnose da disponibilidade de fósforo, seguem os seguintes pontos: a) agrupar solos em classes para fins de recomendação de fertilizantes fosfatados; b) predizer a probabilidade de uma resposta confiável à aplicação de fertilizantes; c) indicar o suprimento de fósforo disponível nos solos.

Para diagnosticar o grau de disponibilidade do fósforo para as plantas, diversos métodos têm sido propostos, sendo geralmente agrupados em métodos químicos, físico-químicos e biológicos (CABALA, 1972).

Os métodos químicos têm sido utilizados há bastante tempo, havendo registros demonstrando que as primeiras análises eram baseadas nos conteúdos totais de fósforo no solo (KAMPRATH & WATSON, 1980). RAIJ (1978) menciona que as determinações de P-total mostraram-se insatisfatórias para informar sobre a disponibilidade do elemento para as plantas. De acordo com KAMPRATH & WATSON (1980), um papel marcante na avaliação do P disponível nos solos, em relação à necessidade de fertilizantes fosfatados, foi desempenhado por DYER em 1894. Este autor considerou, em seu estudo, que a solução extratora ideal seria aquela que possuísse um pH semelhante ao da seiva da raiz. O estudo indicou que a acidez da seiva da raiz de várias espécies foi equivalente a uma solução de ácido cítrico 1%. Esta solução foi testada, então, para estimar o P disponível usando amostras de solo da estação de Rothamsted, na Inglaterra.

Um outro importante passo, neste sentido, foi o trabalho desenvolvido por RUSSEL & PRESCOTT (1917), onde foi verificado que soluções diluídas de ácidos fortes (HNO₃ e HCl) extraem menos P do que ácidos fracos (ácido cítrico e oxálico), nas mesmas concentrações. Isso foi atribuído ao fato dos íons citrato e oxalato reduzirem a adsorção de P do solo.

Desde então, uma série de métodos têm sido propostos para uso em análises de rotina, alguns de caráter alcalino, outros de caráter ácido, sendo estes últimos os mais frequentes. Entretanto, o fósforo disponível, avaliado por essas metodologias, constitui apenas uma parte do fósforo inorgânico, que varia em função do grau e natureza química do extrator (CABALA, 1972).

Os métodos, hoje existentes, extraem quantidades variáveis de fósforo, raramente equivalentes, no entanto, correlacionadas com o fósforo na

forma lábil, o que caracteriza o fator quantidade. Entretanto, esta forma é constituída por vários compostos fosfatados, intrínsecos ao próprio solo, formados pela adição de íons fosfato de fertilizantes ou ainda por compostos utilizados como fertilizantes que não completaram suas reações de dissolução no solo. As características do solo é que vão determinar os compostos fosfatados que constituirão seu fator quantidade, sendo basicamente, compostos ligados à ferro, alumínio e cálcio, cujas quantidades e combinações dependem do material de origem, do grau de intemperismo do solo, bem como de práticas de manejo a longo prazo (THOMAS & PEASLEE, 1973).

2.5.1 Classificação dos extratores de fósforo disponível no solo

De acordo com NELSON et al. (1953) e BINGHAM (1962), os métodos utilizados na análise de fósforo em solos podem ser classificados pelos reagentes químicos empregados.

Diversas tentativas foram realizadas com a intenção de classificar os diferentes métodos de extração de fósforo do solo, segundo suas peculiaridades. Uma classificação tradicional, citada na literatura, foi sugerida por THOMAS & PEASLEE (1973), onde os extratores foram agrupados em: a) soluções concentradas de ácidos minerais; b) soluções de ácidos fracos; c) soluções tamponadas de bases; d) soluções de sais neutros; e) soluções diluídas de sais e ácidos em água.

Os métodos de extração de fósforo podem ainda ser classificados em várias categorias, relacionadas com a natureza química das soluções extratoras. A classificação proposta por KAMPRATH & WATSON (1980) leva em conta que os ânions na solução podem ter um efeito específico

qualquer, devido à sua habilidade de troca ou sua relação com o cátion associado ao P. Esta classificação consiste em reunir os extratores em quatro grupos:

a) Concentrações diluídas de ácidos fortes:

Os ácidos comumente usados para extrair P são HCl, HNO₃ e H₂SO₄, em concentrações que variam de 0,002 a 0,075N. O pH das soluções geralmente situam-se entre 2 e 3. Os íons cloreto e nitrato têm muito pouco efeito sobre a extração, mas o sulfato tende a reduzir a readsorção do fósforo, dissolvido pelas soluções ácidas.

b) Concentrações diluídas de ácidos fortes mais um íon complexante:

O íon complexante usado mais freqüentemente é o fluoreto, que forma um forte complexo com o íon Al. O composto de fluoreto geralmente usado é o NH₄F. As concentrações do ácido variam de 0,025 a 0,1N, enquanto que a concentração de NH₄F geralmente é 0,03N. As soluções extratoras mais comuns desse grupo são misturas de HCl e NH₄F.

c) Concentrações diluídas de ácidos fracos:

As soluções de ácidos fracos ou sais, mais comumente empregadas para a extração de P, são aquelas que contém ácido cítrico, láctico ou acético. Neste grupo, enquadra-se um dos primeiros extratores usados na determinação de fósforo do solo, a solução de ácido cítrico 1%. Estão incluídas também neste grupo, soluções de lactato de cálcio mais HCl; ácido acético tamponado com acetato de sódio a pH 4,8. Nestas soluções, os ânions orgânicos, tais como citrato e lactato, tendem a influenciar de duas formas a extração:

formando complexos com cátions polivalentes liberando o P adsorvido no solo e evitando a readsorção do P liberado.

d) Soluções alcalinas tamponadas:

A solução alcalina tamponada mais comumente empregada na extração de P é a de NaHCO₃, que foi originalmente desenvolvida para solos calcáreos (OLSEN et al., 1954). O H₂CO₃ é bastante efetivo na substituição do P adsorvido no solo e o Na reduz a atividade do cálcio em solução.

KAMPRATH & WATSON (1980) classificam ainda as reações pelas quais o fósforo é removido da fase sólida dos solos, pelas soluções extratoras:

- a) Ação solvente de ácidos: As soluções usadas em geral possuem pH de 2 a 3 e a acidez assegura a dissolução de fosfatos ligados ao cálcio, podendo também solubilizar alguns fosfatos de Al e Fe. A ordem de maior solubilidade nestas soluções ácidas é P-Ca > P-Al > P-Fe (THOMAS & PEASLEE, 1973).
- b) Substituição de ânions: Os fosfatos adsorvidos na superfície de CaCO₃ e óxidos hidratados de Fe e Al podem ser substituídos por outros ânions, tais como acetato, citrato, lactato, sulfato e bicarbonato. Esses ânions, quando presentes em soluções ácidas, reduzem a readsorção de P.
- c) Complexação de cátions combinados com P: Os íons fluoreto são muito efetivos na complexação de íons Al, liberando o fósforo ligado ao metal (CHANG & JACKSON, 1957). O cálcio é precipitado pelos íons fluoreto, e assim, o

fósforo presente no solo como fosfato dicálcico também é extraído. Os ânions citrato e lactato também complexam íons alumínio.

d) Hidrólise de cátions combinados com P: Soluções extratoras contendo íons OH- extraem P ligado ao Al e Fe, devido à hidrólise desses metais. A solução de bicarbonato de sódio a pH 8,5 é muito eficiente na extração de P-Al e algumas vezes P-Fe.

2.5.2. Avaliação dos extratores de fósforo do solo

A adequação de um método de análise de solo, para predizer o estado do fósforo no solo, pode ser avaliada através de correlação entre o P extraído, por um determinado extrator químico, com parâmetros da planta, tais como produção, produção relativa, P-absorvido e concentração de P (FITTS & NELSON, 1956).

KAMPRATH & WATSON (1980) consideram que o método ideal, para análise de fósforo no solo, seria aquele que não fosse influenciado por diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas do solo. Por outro lado, THOMAS & PEASLEE (1973) consideram que um extrator para ser indicado como bom índice na quantificação das necessidades de fertilizantes fosfatados, em algumas combinações solo-cultura-clima, deveria atuar da seguinte forma: (I) dissolver e/ou dessorver algumas proporções reproduzíveis e consistentes do P-lábil; e (II) refletir a extensão e natureza das reações entre os solos e alguns fertilizantes fosfatados adicionado ao solo.

Esses pressupostos demonstram a dificuldade em se obter um extrator químico, que atenda satisfatoriamente todos os fatores que afetam sua

eficiência. HOLFORD & MATTINGLY (1976) relatam dois problemas fundamentais envolvidos na avaliação do fósforo disponível no solo, através de extratores químicos: a dificuldade em medir todo o fósforo considerado disponível no solo para as plantas e a impossibilidade de medir a capacidade tampão do solo. Os autores mencionam ainda que um o extrator não indicaria a capacidade do solo em manter o fósforo na solução, durante o período de crescimento do vegetal. Contudo, RAIJ (1978) considera que, como ponto de partida para recomendações de adubação, a maioria dos métodos para fósforo, no uso rotineiro de análise de terras, baseiam-se em determinações que refletem o fator quantidade ou o fator intensidade.

Na comparação dos diferentes métodos, mencionados na literatura, amplas revisões têm contribuído para o melhor entendimento do comportamento dos extratores na disponibilidade de fósforo para as plantas, podendo ser citados: NELSON et al. (1953); ANDERSON (1960); BINGHAM (1962); KAMPRATH & WATSON (1980); CABALA (1972); RAIJ (1978).

Algumas características intrínsecas dos próprios extratores parece indicar as condições de solo-clima-cultura, mais adequadas para obtenção de sua melhor eficiência.

Segundo KAMPRATH & WATSON (1980), os extratores ácidos extraem mais fósforo ligado ao cálcio no solo e apenas pequena proporção ligado ao alumínio e ferro. Considerando que em solos ácidos e ricos em óxidos de ferro e alumínio e caulinita, como ocorre na maioria dos solos brasileiros e em especial os da Amazônia, os produtos de reação do fósforo no solo são fosfatos de ferro e alumínio, o que leva a concluir que esses extratores não deveriam ser a melhor opção para extrair o elemento de tais solos (RAIJ, 1991).

O extrator duplo ácido, hoje designado Mehlich-1, foi introduzido em 1954, para uso em solos da Carolina do Norte (USA). O extrator é formado pela mistura de dois ácidos fortes diluídos (HCl 0,05N e H₂SO₄ 0,025N) e passou a ser usado em diversos estados do Brasil a partir de 1965, na proporção de 10 cm³ de terra para 100 ml de solução (RAIJ, 1987). Sua ação extratora se dá pela ação ácida, que promove a protonação do fósforo e pela troca aniônica em que os radicais cloreto e principalmente os sulfatos substituem os fosfatos ligados à cálcio e em menor proporção os ligados ao alumínio e ferro (NELSON et al., 1953). Os íons sulfato atuam ainda reduzindo a readsorção do fósforo do solo, durante o processo de extração. Este extrator demonstrou ser mais satisfatório quando usado em solos que tinham pH 7 ou menos (FITTS & NELSON,1956), condições de baixa CTC, alto grau de intemperismo, pouco P-Ca. Em solos com altos teores de óxidos de Fe e argila dão baixos valores de P, devido à neutralização do ácido (THOMAS & PEASLEE, 1973).

Do ponto de vista prático, essas afirmações têm sido confirmadas, sendo comum a obtenção de resultados excessivamente baixos de P com certos solos argilosos que vêm sendo adubados com fósforo, nos quais as culturas produzem razoavelmente bem e respondem pouco à adubação fosfatada (RAIJ, 1991). Quando são adicionados aos solos fosfatos de baixa solubilidade, como fosfatos naturais, onde as partículas não reagem completamente nos solos, havendo resíduos inalterados do fosfato, a utilização de extratores ácidos, como o Mehlich-1, pode extrair quantidades de fósforo superiores àquelas ditas disponíveis, não apresentando boas correlações com os rendimentos das culturas ou com as quantidades absorvidas do elemento (DOLL et al., 1960; BARNES & KAMPRATH, 1975; RAIJ & DIEST, 1980). Entretanto, quando as fontes de

fósforo são mais solúveis e completam as reações de dissolução no solo, os extratores ácidos passam a apresentar resultados satisfatórios (CAJUSTE & KUSSOW, 1974; ANGHINONI, 1972; BALERDI et al., 1968.

Apesar do número elevado de métodos de extração de fósforo citados na literatura, se for considerada, no processo de extração, a premissa de não dissolução de formas não disponíveis ou de resíduos de fosfatos naturais que possam ocorrer no solo, as opções são bastante reduzidas.

De acordo com KAMPRATH & WATSON (1980), o extrator Bray-I pode ser recomendado para solos que possuem amplas variações nas propriedades químicas. THOMAS & PESLEE (1973) consideram que, para solos com valores de CTC variando de baixo a médio e de intemperização moderada a alta, provavelmente seria indicada a utilização deste extrator. Entretanto, em solos contendo CaCO3 livres ou solos argilosos com alta CTC e alta saturação por base, reduziriam a eficiência do extrator. Sua ação extratora ocorre em virtude da acidez e/ou do ânion fluoreto. O HCl diluído solubiliza as formas de fósforo facilmente solúveis e dissolve, mais fortemente, o fósforo ligado ao cálcio. O cálcio é precipitado pelos ions fluoreto e, consequentemente, o P presente no solo como CaHPO₄ seria extraído (KAMPRATH & WATSON, 1980). O fluoreto presente no extrator em meio ácido complexa o P-Al e P-Fe liberando desta forma o fósforo (SMITH et al., 1957). SALOMON & SMITH (1956) e SMITH et al. (1957) demonstraram que este método distingue, com certa versatilidade, solos que receberam aplicação de fosfato natural, daqueles que receberam fosfatos solúveis, verificando que as frações do fosfato natural não dissolvidas nos solos, permaneceram inalteradas pelo extrator.

Alguns autores têm destacado os bons resultados do extrator Bray-I em solos que receberam aplicação de diferentes fontes fosfatadas. RAIJ & DIEST (1980) obtiveram altas correlações entre o fósforo absorvido pela planta e o extraído pelo método Bray-I, quando variaram as fontes de fósforo adicionadas. McLEAN & LOGAN (1970), avaliando fontes de fósforo com diferentes solubilidades em água, assinalaram que as diferenças observadas nos efeitos dos fosfatos sobre a disponibilidade de fósforo, foram também detectadas pelo extrator.

Uma crítica que frequentemente tem sido atribuída aos extratores químicos, reside no fato deles alterarem as condições químicas naturais do solo (WILLIAMS, 1951). Tentando contornar este problema, algumas técnicas têm sido propostas se fundamentando em conceitos físico-químicos, que consideram os parâmetros intensidade, velocidade e capacidade (CABALA, 1972). Dentre as metodologias, destacam-se as que utilizam resinas de troca iônica.

Como método de avaliação do P no solo, a resina de troca aniônica tem sido pesquisada há bastante tempo, em diversos países, com resultados bastante expressivos em relação aos demais métodos, tendo sido inicialmente considerada apenas como uma opção de pesquisa. Após alguns ajustes na metodologia, a resina passou a ser usada como método rotineiro em muitos laboratórios, sendo então rapidamente difundida pela sua versatilidade e adaptabilidade a diferentes condições de solo.

Essa técnica foi introduzida por AMER et al. (1955) que propuseram o seu uso para remover a fração lábil de P inorgânico do solo. Os autores observaram que no sistema em suspensão, em condições adequadas, a

velocidade com que o P era adsorvido pela resina dependeu somente da velocidade de sua liberação pelo solo e não das propriedades da resina. Foi verificado ainda, que a adsorção nos primeiros minutos de contato, evidenciava o fósforo presente na solução, enquanto que as quantidades adsorvidas posteriormente vinham das formas cálcicas.

O processo de extração de fósforo no solo pela resina tem características que lhe proporcionam um suporte teórico que a maioria dos métodos não possuem. A resina trocadora de íons é um produto comercializado em pequenas esferas de diâmetro de aproximadamente 1 mm ou menos. O material é poroso, graças a estrutura matricial de cadeias de poliestireno. Os grupos funcionais existentes nessas cadeias orgânicas são radicais de amônio quaternário. Esses grupamentos são do tipo base forte, dissociando-se, portanto, a qualquer valor de pH. O processo de extração ocorre em suspensão aquosa de terra e resina, havendo uma transferência de fósforo para a resina em função do equilíbrio que existe entre P-lábil e o P em solução. Tendo em vista que a capacidade de troca de ânions da resina é muito alta, tem-se na realidade uma transferência do fósforo lábil do solo para a resina (RAIJ, 1991).

Em ampla revisão, analisando uma série de extratores químicos, comumente utilizados no Brasil, RAIJ (1978) constatou a superioridade do método da resina na extração de fósforo do solo, em comparação com diversos outros métodos, como Olsen, Bray-I, Bray-II, Mehlich-1, Truog e Morgan, dentre outros. O fósforo extraído pelo método da resina tem apresentado boas correlações com a resposta biológica em diversos estudos (LATHWNELL et al., 1958; DIEST et al., 1960; COOKE & HISLOP, 1963; PALMA &

FASSBENDER, 1970; BACHE & IRELAND, 1980; RAIJ et al., 1984; RAIJ et al., 1986; RAIJ & QUAGGIO, 1990).

Recentemente, foi desenvolvido o método do papel de filtro impregnado com óxido de ferro, para avaliação do fósforo disponível do solo. ZEE et al. (1987) propuseram o uso deste método para extrair P do solo, considerado como disponível para as plantas. Este método possui um princípio similar ao da resina trocadora aniônica. No procedimento analítico, entretanto, utilizam-se tiras de papel de filtro impregnado com óxido de ferro, como reservatório para adsorver o P em uma suspensão solo-solução (MENON et al., 1990a), e necessitando apenas que o papel de filtro seja enxaguado, para separação das partículas de solo, após a extração (LIN et al., 1991).

O processo de extração de fósforo do solo pelo método do papel de filtro se assemelha ao comportamento dos óxidos e hidróxidos de Fe do solo, na adsorção de fósforo (MENON et al., 1990b). Deste modo, o óxido de ferro (Fe-gel) é impregnado na superfície do papel de filtro (Pi), em forma não cristalizada (amorfa), e que possui uma elevada superfície de área para adsorção do P do solo. A superfície dos óxidos de Fe amorfos, reage imediatamente com os íons fosfatados em suspensão e formam fosfatos de ferro, insolúveis em água, sobre o papel de filtro. O papel de filtro funciona, então, como um depósito contínuo para depressão dos íons fosfato na solução (MENON et al., 1989b). Devido à dessorção dos fosfatos das partículas do solo para o papel de filtro ser um processo de difusão controlada, a extração por este método simula o processo natural em que as raízes das plantas absorvem os íons fosfatos da solução, em condições de campo.

A quantidade de P adsorvido pelas tiras de papel de filtro (Pi) depende da superfície de área do papel e do tempo de contato entre este e a suspensão solo-solução (MENON et al., 1990a e 1990b). Uma tira com superfície reativa de 40 cm² de área foi considerada adequada para reter uma quantidade de P normalmente equivalente a resposta de culturas à aplicação de fertilizantes (MENON et al., 1990a). ZEE et al. (1987) assinalam que uma tira de papel de filtro com as dimensões de 10 cm x 2 cm contém aproximadamente 120 μmoles de Fe e poderia ser capaz de adsorver acima de 18 μmoles de P.

Estudos de correlação tem mostrado que o método do papel de filtro é um efetivo teste de solo para fósforo em condições de solos ácidos e calcáreos, tratados com fertilizantes. MENON et al. (1988) compararam a eficiência de alguns extratores (Bray-I, Bray-II, duplo ácido, Olsen, água e resina) com o método do papel de filtro, na avaliação da disponibilidade de P para a cultura do milho, em quatro solos com valores de pH variando entre 4,5 a 8,2 e utilizando superfosfato triplo e fosfato natural da Flórida. Os resultados demonstraram que o método do papel de filtro apresentou a melhor correlação com o P-absorvido e produção de matéria seca. Resultados semelhantes têm sido obtidos em outros estudos (MENON et al., 1989a; MENON et al., 1990a; LIN et al., 1991), mostrando que este método apresenta-se como uma alternativa na avaliação de P disponível do solo. Contudo, resultados pouco animadores foram obtidos por SILVA (1991), onde não foram obtidas boas correlações do método com respostas da planta. O autor menciona, entretanto, que os dados apresentaram elevado coeficiente de variação, indicando a necessidade de maiores esforços na solução de problemas metodológicos da técnica proposta.

Uma infinidade de soluções extratoras de fósforo do solo têm sido recomendada, por mais de meio século, para avaliação da disponibilidade do fósforo para as plantas. Apesar de muitas delas ainda estarem em uso em diferentes regiões do mundo, provavelmente estarão condenadas à serem substituídas por outra mais eficientes, devido às muitas desvantagens resultantes de métodos tão heterogêneos (BUONDONNO et al., 1992).

Contudo, nos últimos anos, alguns novos extratores foram desenvolvidos, oferecendo a promessa de vantagens sobre aqueles que estão em uso atualmente. Entre estes, o extrator Mehlich-3, que foi introduzido em 1984 para uso em solos ácidos (MEHLICH, 1984), tem apresentado crescente interesse para predizer a disponibilidade de fósforo para as plantas. Segundo JONES (1990), este extrator é considerado adequado para avaliar o P de solos que, atualmente, estão sendo analisados pelo extrator Mehlich-1.

Dentre os métodos de extração ácida, o Mehlich-3 (CH₃COOH 0,2N; NH₄NO₃ 0,25N; NH₄F 0,015N; HNO₃ 0,013N e EDTA 0,001M) foi considerado como o procedimento mais apropriado e econômico para análise de solo em laboratório, devido à sua capacidade de extrair do solo, simultaneamente, outros nutrientes (K, Ca, Mg, Na, B, Cu, Fe, Mn e Zn), além de fósforo (TRAN et al., 1990).

Este método foi adaptado a partir do extrator Mehlich-2 (CH₃COOH 0,2N; NH₄Cl 0,2N; NH₄F 0,015N e HCl 0,012N), que é constituído por uma série de compostos químicos com atuação específica sobre as formas de fósforo do solo. O NH₄F foi introduzido com o propósito de liberar ânions fosfato, ligados ao alumínio do complexo P-Ca,Fe,Al (MEHLICH,1978). MEHLICH (1984) assinala que o fluoreto foi incluído no extrator Bray-I para

promover extração seletiva do fósforo, mas devido à baixa capacidade tampão do método, uma larga proporção de extração tornou-se necessária em solos neutros a alcalinos. Neste aspecto, o autor sugere, que para obter a máxima vantagem do componente fluoreto, durante o processo de extração, seria necessário a manutenção de um pH menor que 2,9. Segundo o mesmo autor, foi observado que o ácido acético atua na decomposição da apatita, em menor grau que os ácidos minerais equivalentes, exibindo alta ação de tamponamento, devido à sua constante de dissociação (1,76 x 10⁻⁵). Algumas modificações foram realizadas no Mehlich-2 para obtenção do Mehlich-3, em virtude de observações feitas durante o processo de extração. Foi o caso da ação do íon cloreto, que apresentou propriedades corrosivas durante a extração, indicando a necessidade de mudança dos compostos que possuem este íon, de modo a reduzir o perigo de corrosão nos materiais e equipamentos de laboratório. Dessa maneira, no extrator Mehlich-3, os íons cloreto foram substituídos por nitratos. A incorporação de EDTA no extrator teve por finalidade apenas aumentar a extração de cobre do solo.

O fósforo do solo extraído pelo Mehlich-3 tem sido bem correlacionado com parâmetros da planta. MICHAELSON & PING (1986), baseados em um experimento em vasos, com 88 solos de Ontario-Alaska, consideraram o extrator Mehlich-3 melhor que os métodos Bray-I, Mehlich-1, Morgan e Olsen. BUONDONNO et al.(1992) compararam a eficiência dos extratores Olsen e Mehlich-3, em 120 solos com diferentes características físicas e químicas, coletados em diferentes locais no sul da Itália. Os resultados mostraram que o Mehlich-3 foi mais eficiente na determinação da disponibilidade de P do solo. TRAN et al. (1990), avaliando a disponibilidade de fósforo em aproximadamente 80 solos de Quebec/Canadá, verificaram que o Mehlich-3 foi

mais confiável que o Bray-I e Bray-II em Spodosols muito ácidos e possuindo alta capacidade de adsorção de fósforo. Poucos trabalhos têm sido realizados com este extrator em solos brasileiros, indicando a necessidade de maiores estudos sobre sua eficiência na disponibilidade de fósforo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e preparo das amostras de solo

As amostras de solo utilizadas neste trabalho foram coletadas em cinco localidades do Estado do Pará, que representam áreas da região Amazônica onde a agricultura é utilizada de forma mais intensiva. As amostras foram retiradas da camada superficial (0-20 cm) de solos classificados como Latossolo Amarelo e Podzólico Vermelho-Amarelo, onde foram selecionados solos com diferentes texturas (Tabela 1).

Nos locais de coleta dos solos, foram retiradas amostras para determinação de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, pelo método do ataque sulfúrico. De acordo com levantamento preliminar do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo - SNLCS/EMBRAPA, os resultados das análises foram, respectivamente, os seguintes: LA m. 9,6%, 6,4% e 0,7%; LA arg. 12,2%, 8,2% e 1,7%; LA m.arg. 24,5%, 32,5% e 3,2%; PV arg. 9,6%, 6,1% e 1,4%; e PV m.arg. 18,4%, 19,1% e 4,8%.

Após a coleta, as amostras foram passadas em peneiras com malha de 4 mm de abertura, para em seguida serem secas ao ar. Subamostras foram retiradas e passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura, para a caracterização física e química.

Tabela 1 - Classificação e localização dos solos utilizados no trabalho.

solo	classificação	localidade		
LA m.	LATOSSOLO AMARELO ÁLICO, A moderado, textura média, fase floresta ombrófila densa, relevo plano à suave ondulado.	Fazenda Laranjeira, muni- cípio de Ipixuna, Estado do Pará.		
LA arg.	LATOSSOLO AMARELO ÁLICO caulinítico, A moderado, textura argilosa, fase floresta equatorial subperenefólia, relevo plano.	Campo Experimental da EMBRAPA, município de Capitão Poço, Estado do Pará.		
LA m.arg.	LATOSSOLO AMARELO ÁLICO, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta ombrófila densa, relevo plano.	Fazenda Patagônia, muni- cípio de Ipixuna, Estado do Pará.		
PV arg.	PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO ÁLICO caulinítico, A moderado, textura média/argilosa, fase floresta equatorial subperenefólia, relevo plano.	Campo Experimental da EMBRAPA, município de Capitão Poço, Estado do Pará.		
PV m.arg.	PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO ÁLICO A moderado, textura argilosa/muito argilosa, floresta equatorial subperenefólia, relevo suave ondulado.	Fazenda "El Dorado", município de Tailândia, Estado do Pará.		

3.2. Caracterização física e química das amostras

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da ESALQ/USP, constando de análise granulométrica com a determinação das classes texturais. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

A análise granulométrica seguiu o método da pipeta, preconizado pela EMBRAPA(1979) e a classificação textural foi realizada de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. A densidade do solo foi determinada conforme descrito por CAMARGO et al.(1986).

Tabela 2 - Características físicas das amostras de solo (0-20 cm)

•	solo				
Características	LA m	LA arg.	LA m.arg	PV arg	PV m.arg.
areia grossa (%)	21	34	7	34	24
areia fina (%)	52	33	10	32	42
silte (%)	5	9	12	8	7
argila (%)	22	24	71	26	27
densidade do solo	1,29	1,27	1,06	1,29	1,28
classes de textura 1	md. aren.	md. aren.	muito arg.	md. arg.	md. arg.

¹ md = moderadamente; aren = arenoso; arg.= argiloso.

A caracterização química das amostras de solo foi realizada através dos procedimentos analíticos descritos por RAIJ & QUAGGIO (1983), sendo apresentada na Tabela 3.

3.3. Análise química dos fosfatos

Foram realizadas análises químicas dos fosfatos utilizados no experimento, seguindo os métodos oficiais de análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes (BRASIL, 1988). Foram determinados os valores de fósforo total, fósforo solúvel em ácido cítrico a 2% (relação 1:100), fósforo solúvel em água mais solução neutra de citrato de amônio e fósforo solúvel em água (Tabela 4).

Tabela 3 - Caracterização química das amostras de solo (0 - 20 cm)

	solo					
Características	LA m.	LA arg.	LA m. arg	PV arg.	PV m.arg.	
M.O. (%) ¹	2,4	2,4	4,0	2,7	2,5	
pH (CaCl ₂) ¹	4,0	3,5	3,5	3,2	3,8	
Ca^{2+} (meq/100 cm ³) ¹	1,0	0,5	1,0	0,4	0,8	
Mg^{2+} (meq/100 cm ³) ¹	0,3	0,2	0,8	0,1	0,2	
$K^+ \text{ (meq/100 cm}^3)^{-1}$	0,17	0,11	0,11	0,07	0,09	
P "disponível" (µg P/cm ³) ²	2	5	9	4	4	
Al^{3+} (meq/100 cm ³) ¹	0,6	1,2	1,5	2,2	0,8	
$H^+ + Al^{3+} (meq/100 cm^3)^{1}$	4,2	5,8	9,8	12,1	4,7	
CTC (meq/100 cm ³)	5,7	6,6	11,7	12,7	5,8	
SB (meq/100 cm ³)	1,5	0,8	1,9	0,6	1,1	
Saturação de Al (%)	29	60	44	79	42	
Saturação por bases (%)	26	12	16	5	19	

¹ RAIJ & QUAGGIO (1983); ² Resina

Tabela 4 - Resultados da análise química dos fosfatos testados

	teor de P ₂ O ₅ (%)					
Fonte de P	total	ác.cítrico(2%)	CNA ¹ + H ₂ O	H ₂ O		
Superfosfato triplo	47,3	38,7	41,3	36,6		
FNCN ²	30,0	10,9	4,1			
Yoorin granular	17,4	12,9	6,1			
Yoorin fino	17,0	17,0	5,1			

¹ CNA = citrato neutro de amônio

² Fosfato Natural da Carolina do Norte

3.4. Capacidade máxima de adsorção de fósforo

A capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos foi determinada de acordo com o método de OLSEN & WATANABE (1957), que utilizaram como modelo matemático a isoterma de Langmuir. As amostras de solo, utilizadas neste estudo, foram passadas em peneira com malha de 1 mm de abertura. Quantidades de 5 g de terra fina seca ao ar (TFSA), de cada um dos tipos de solo, foram colocadas em erlenmeyer contendo 50 ml de soluções com CaCl₂ 0,05M e concentrações crescentes de fósforo, na forma de KH₂PO₄. As concentrações variaram de 20 a 100 μg P/ml. As soluções de fósforo continham 0, 20, 40, 60, 80 e 100 μg P/ml e cada tratamento apresentou três repetições. As amostras foram agitadas por 16 horas em agitador rotativo horizontal, à temperatura ambiente. Após esse período, a suspensão foi filtrada. No extrato filtrado, o fósforo foi determinado pelo método colorimétrico baseado no emprego do reativo sulfo-bismuto-molíbdico e usando ácido ascórbico como redutor (CATANI & BATAGLIA, 1968).

O cálculo de fósforo adsorvido, nos solos estudados, foi obtido pela diferença entre as quantidades de fósforo aplicadas e as quantidades que ficaram em equilíbrio. Os dados calculados foram ajustados a isoterma de Langmuir, através de equação de regressão na forma linear, para obtenção dos coeficientes linear e angular.

3.5. Instalação e condução do experimento em casa de vegetação

Para avaliar a disponibilidade de fósforo do solo e a eficiência de fertilizantes fosfatados em amostras de solos da Amazônia, foi conduzido um

experimento em vasos, em casa de vegetação do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, em Piracicaba.

O experimento foi realizado utilizando caupi e arroz como plantas-teste, empregando-se quatro fontes de fósforo nas doses de 0, 40, 80 e 120 mg P/kg de terra. Os fosfatos utilizados foram: superfosfato triplo, termofosfato magnesiano semi acabado (yoorin-granular), termofosfato magnesiano em pó (yoorin-fino) e fosfato natural da Carolina do Norte. A granulometria dos termofosfatos variou de acordo com seu estado de acabamento, sendo a seguinte: semi acabado - 100% das partículas passam em peneira com malha de 0,84 mm (peneira 20 da ABNT); em pó - 75% das partículas passam em peneira com malha de 0,15 mm (peneira 100 da ABNT). O fosfato natural da Carolina do Norte foi utilizado em forma grosseira, com 64% das partículas passando em peneira com malha de 0,3 mm (peneira 50 da ABNT).

Os tratamentos foram avaliados através do delineamento experimental em blocos casualisados, com três repetições. Como delineamento de tratamento utilizou-se um arranjo fatorial 5x4x4, correspondendo a cinco solos, quatro fontes e três doses de fósforo mais a testemunha (sem aplicação de fosfato).

Utilizou-se amostras de 3,5 kg de terra, acondicionadas em vasos plásticos com capacidade de 4 kg de terra. Para reduzir a interferência da acidez natural dos solos, na disponibilidade de fósforo para as plantas, as amostras de solo receberam aplicação de calcário. Todos os tratamentos receberam aplicação de calcário dolomítico que possuía as seguintes características: 20,8% de CaO; 12,48% de MgO; RE 97%; PN 107%; e PRNT 104%. As quantidades de calcário aplicadas às amostras de terra, foram

calculadas com base no critério da necessidade de calagem preconizado pelo IAC (RAIJ et al., 1992), que consistiu basicamente na elevação da saturação por bases a 40%, em função das culturas que foram utilizadas. O calcário foi uniformemente misturado às amostras de terra, sendo em seguida incubadas por um período de 15 dias. As amostras foram irrigadas periodicamente, mantendo a umidade do solo em aproximadamente 60% da capacidade de retenção de água.

Completado o período de incubação, foi realizada a aplicação dos fosfatos com base no teor de P₂O₅ total de cada produto, segundo os tratamentos. Em seguida efetuou-se a amostragem de terra para determinação dos teores de fósforo do solo pelos diferentes extratores.

Foram realizados dois cultivos consecutivos, utilizando-se inicialmente o caupi (cultivar Poty - CNC 1371) e logo em seguida o arroz (cultivar IAC 25), para avaliação do efeito residual dos fosfatos. A semeadura do caupi foi realizada distribuindo-se 10 sementes por vaso, desbastando-se posteriormente para três plantas. Na ocasião da semeadura, as sementes de caupi foram inoculadas com uma mistura de estirpes de Rhizobium (CN-1525, CN-1527, CN-1545), através do embebimento das sementes em solução contendo a mistura dos inoculantes.

Durante toda a duração do experimento, a umidade do solo foi mantida próxima a 60% da capacidade de retenção de água.

A colheita do caupi foi realizada 52 dias após a semeadura, efetuando-se o corte da parte aérea das plantas, rente ao solo. As amostra de terra foram retiradas dos vasos e destorroadas, para, em seguida, realizar-se a coleta de subamostras para determinação do fósforo disponível pelos extratores.

A semeadura do arroz foi efetuada colocando-se 15 sementes por vaso, desbastando-se posteriormente para oito plantas. Realizou-se uma adubação básica com nitrogênio, potássio e micronutrientes. Como fontes de nitrogênio e potássio, utilizou-se uréia e cloreto de potássio, dissolvidos em água, nas doses de 200 e 250 mg do nutriente por vaso, respectivamente. A aplicação desses adubos foi realizada parceladamente em duas vezes, sendo a primeira efetuada logo após a germinação e a segunda com intervalo de dez dias. Os micronutrientes foram aplicados via solução, na dose de 20 ml por vaso, utilizando-se as seguintes quantidades: 1; 1; 0,1 e 2,5 ppm de B, Cu, Mo e Zn, nas respectivas formas de H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.H₂O e ZnSO₄.7H₂O.

A colheita do arroz foi realizada 46 dias após a semeadura, efetuando-se o corte da parte aérea das plantas. O material obtido nas colheitas de caupi e arroz foi acondicionado em sacos de papel e levado para estufa com temperatura de 65 °C, para secagem até obtenção de peso constante. Em seguida o material foi pesado e moído, para determinação da concentração de P nos tecidos vegetais.

3.6. Análise do material vegetal

A concentração de fósforo nos tecidos das plantas foi determinada por via úmida, de acordo com a metodologia descrita por SARRUGE & HAAG (1974), consistindo em digestão com extrato nítrico-perclórico na proporção de 10 ml de HNO₃ e 2 ml de HClO₄, e utilizando o método colorimétrico, para determinação do elemento.

3.7. Extração e determinação de fósforo do solo

Para caracterizar a disponibilidade de fósforo, os solos foram analisados através dos extratores de Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-I, Resina trocadora aniônica e Papel de filtro impregnado com óxido de ferro.

3.7.1. Extrator Mehlich-1 ou Carolina do Norte

Esse método foi empregado como padrão de comparação para aferir a disponibilidade de fósforo, já que é o extrator utilizado rotineiramente na maioria dos laboratórios de solo na região Amazônica. Para a extração foram utilizados 10 g de terra em 100 ml (VETTORI, 1969) da solução extratora de HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N (NELSON et al., 1953), procedendo-se em seguida agitação por quinze minutos. Após a extração as suspensões foram filtradas e determinou-se o fósforo colorimetricamente.

3.7.2. Extrator Bray-I

O método originalmente é conhecido por Bray-I e emprega solução de NH₄F 0,03N e HCl 0,025N (BRAY & KURTZ, 1945). Para a extração foram utilizados 7 g de terra com 50 ml de solução extratora e agitação da suspensão por um minuto. Após isso, as amostras foram filtradas e o extrato foi utilizado para determinar o fósforo pelo método colorimétrico.

3.7.3. Método da resina trocadora aniônica

Foi utilizado o método da resina trocadora de íons (RAIJ & QUAGGIO, 1983), saturada com bicarbonato de sódio (NaHCO₃ 1N a pH 8,5), empregando-se uma mistura de volumes iguais de resinas Amberlite IRA-400

(base forte) e Amberlite IRA-120, previamente passadas em peneira com abertura de 0,5 mm. Para a extração foram transferidos 2,5 cm³ de terra para frasco plástico de 80 ml, provido de tampa, acrescentando-se 25 ml de água destilada e agitando-se por quinze minutos. Em seguida, foram adicionados 2,5 cm³ de resina regenerada, agitando-se por 16 horas em agitador rotativo horizontal. Após esse período a resina foi lavada com água para retirar a argila. Para a extração do fósforo contido na resina, foram utilizados 50 ml de solução NH₄Cl 0,8N + HCl 0,2N, deixando-se em repouso por 30 minutos para eliminar o gás carbônico e agitando-se em seguida por uma hora. O extrato foi utilizado para a determinação do fósforo, através do método colorimétrico (MURPHY & RILEY, 1962).

3.7.4. Extrator Mehlich-3

O procedimento analítico foi realizado com base no método original descrito por MEHLICH (1984). A solução extratora correspondeu a uma mistura de ácido acético 0,2N; nitrato de amônio 0,25N; fluoreto de amônio 0,015N; ácido nítrico 0,013N e etilenodiaminatetraacético (EDTA) 0,001M. Na preparação desta solução, o EDTA foi solubilizado separadamente com fluoreto de amônio, formando uma solução estoque, para posterior mistura com os demais reagentes, conforme determina o método original. O pH final da solução ficou em média 3,01±0,1. Para extração foram utilizados 10 g de terra em 100 ml da solução extratora e procedeu-se a agitação por cinco minutos. Após a extração, efetuou-se a filtragem das suspensões e o extrato foi utilizado para determinação do fósforo pelo método, conforme descrito por MEHLICH (1978).

3.7.5. Método do papel de filtro (Pi) impregnado com óxido de ferro

Este método foi utilizado apenas para caracterização da disponibilidade de fósforo, na cultura do arroz. Para extração de fósforo do solo com papel de filtro impregnado com óxido de ferro, utilizou-se a metodologia original proposta por MENON et al. (1988), que distingue o método em duas fases: preparação do papel de filtro e extração propriamente dita. A preparação consistiu em mergulhar os papéis de filtro em solução de cloreto de ferro (FeCl₃) 10%, acidificada com HCl. Após drenado o excesso de solução, os papéis foram colocados para secar em temperatura ambiente, por uma hora. Em seguida, passou-se os papéis de filtro rapidamente em vapor de amônia, obtido por solução de hidróxido de amônio 5%. Como o vapor de amônia reage com o cloreto de ferro sobre o papel, há a formação de óxido de ferro, com coloração marrom. Os papéis foram então cortados em tiras de 12 x 2 cm. A extração foi realizada utilizando-se 1 g de terra em 40 ml de solução 0,01M de CaCl₂, contendo uma tira de papel de filtro dobrada (para facilitar a agitação). Procedeu-se agitação por 16 horas e em seguida as tiras de papel de filtro foram enxaguadas com água destilada, para remover as partículas de solo aderidas. As tiras foram então colocadas em 40 ml de solução de H₂SO₄ 0,2N para agitação por uma hora. A determinação da concentração de fósforo na solução final foi realizada pelo método colorimétrico (MURPHY & RILEY, 1962).

3.8. Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F), de acordo com o delineamento proposto. As comparações entre as

médias das combinações dos diferentes fatores foram realizadas com o auxílio do teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Em cada cultivo, foram ajustadas equações de regressão para matéria seca e conteúdo de fósforo na parte aérea das plantas em função das doses de fósforo aplicadas, para todos os solos e fontes de fósforo. Também foram efetuados estudos das possíveis correlações entre matéria seca e conteúdo de fósforo da parte aérea com o fósforo extraído do solo pelos diferentes extratores, em função dos solos e fontes de fósforo.

A avaliação dos fosfatos foi realizada através do cálculo do Índice de Eficiência Agronômica (IEA), descrito por GOEDERT et al. (1986). Este índice é calculado com base no diferencial de produção, obtido entre as fontes testadas, comparadas com a mesma dose de P total aplicado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Capacidade de adsorção de fósforo dos solos

No Apêndice 1 constam os dados originais obtidos no ensaio de adsorção de fósforo, para os vários solos.

A adsorção de fósforo nos solos utilizados, foi avaliada através da capacidade máxima de adsorção, obtida com um tempo de equilíbrio de 16 horas, sendo que os valores de adsorção máxima, da constante relacionada com a energia de retenção (K), equações de regressão linear de Langmuir e os seus respectivos coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de adsorção máxima de fósforo (b), energia de adsorção (K), equações lineares de Langmuir e coeficientes de correlação, para os diferentes solos estudados.

solo	b (mg P ads./g solo)	energia de adsorção (K)	equação de regressão	coeficiente de correlação
LA arg.	0,317	0,104	y = 30,52 + 3,16 x	0,995
LA m.arg.	0,628	0,205	y = 7,75 + 1,59 x	0,994
LA m.	0,239	0,199	y = 21,05 + 4,18 x	0,997
PV arg.	0,327	0,174	y = 17,61 + 3,06 x	0,997
PV m.arg.	0,255	0,168_	y = 23,34 + 3,93 x	0,997

Os valores de capacidade máxima de adsorção e energia de adsorção indicam que há diferenças entre os solos estudados. Observou-se que o LA m.arg. possui a mais elevada capacidade de adsorção de fósforo, destacando-se bastante dos demais. Com valores intermediários de adsorção máxima, encontram-se o PV arg. e o LA arg., enquanto que os mais baixos valores foram observados para o PV m.arg. e o LA m.

As isotermas de adsorção (Figuras 1 e 2) demonstram que as quantidades de fosfatos adsorvidas pelos solos aumentaram com a concentração da solução de equilíbrio, inicialmente de modo mais intenso e tendendo a adquirir um valor constante em altas concentrações. As isotermas possuem forma característica de adsorção química de uma monocamada aniônica, pela fase sólida adsorvente do solo (BARROW, 1961).

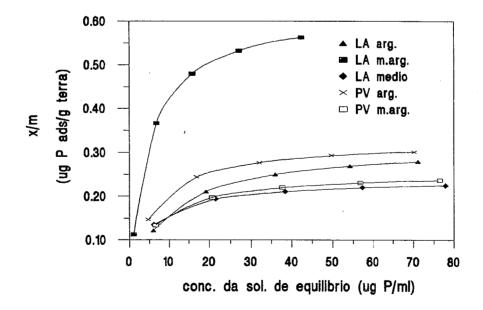


Figura 1 - Isotermas de adsorção de fósforo para os solos estudados.

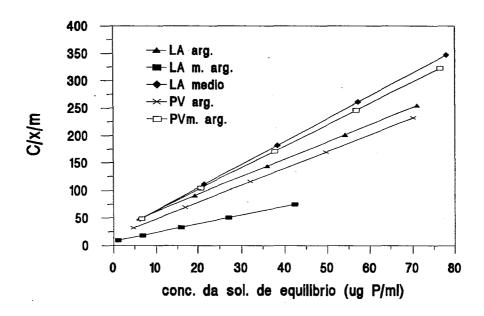


Figura 2 - Isotermas de adsorção de Langmuir na forma linear, para os solos estudados.

TUCCI (1991) trabalhando com solos procedentes de Manaus, encontrou valores de capacidade máxima de adsorção da mesma dimensão, que os obtidos neste trabalho, para os solos de mesma classe.

Os valores de capacidade máxima de adsorção e energia de adsorção foram relacionadas à algumas características dos solos (Tabela 6), para obtenção de informações à respeito de quais constituintes podem estar atuando no processo de retenção de fósforo. Foram obtidos coeficientes de correlação altamente significativos para as relações entre os teores de argila, de matéria orgânica e a adsorção máxima dos solos. Estes resultados concordam com os obtidos por alguns autores (FASSBENDER, 1966b; MACIEL, 1974; BITTENCOURT & ZAMBELO, 1975a), onde foram observadas altas correlações entre os teores de argila, de matéria orgânica e a adsorção máxima dos solos.

Tabela 6 - Relações entre as constantes b e K de Langmuir e algumas características dos solos estudados.

características	equação de	coeficiente de
dos solos	regressão	correlação
b x argila	y = -11,11 + 0,13 x	0,973
b x mat.orgânica	y = 1.31 + 0.004 x	0,977
b x pH	y = 3.88 - 0.001 x	0,400
b x Ca ²⁺	y = 0.55 + 0.0005 x	0,300
$b \times AL^{3+}$	y = 0.68 + 0.0016 x	0,411
$b \times H^{+} + Al^{3+}$	y = 3,00 + 0,012 x	0,559
K x argila	y = -7,93 + 246,73 x	0,479
K x mat.orgânica	y = 1,29 + 8,85 x	0,521
K x pH	y = 3,26 + 1,97 x	0,257
K x Ca ²⁺	y = -0.08 + 4.81 x	0,691
$K \times AL^{3+}$	y = 1,31 - 0,326 x	0,021
$K \times H^{+} + Al^{3+}$	y = 4,16 + 18,78 x	0,217

SÁ Jr. et al. (1968), avaliando a retenção de fósforo em 17 solos de Pernambuco, verificaram que os valores de adsorção máxima de fósforo foram maiores para os solos com textura argilosa, enquanto que os solos com textura arenosa, apresentaram valores menores. TUCCI (1991) também verificou que aumentando os teores de argila houve aumento da capacidade máxima de adsorção em solos de Manaus. O autor menciona, que variações na capacidade de retenção de fósforo de diferentes solos, com teores de argila semelhantes, são provavelmente, devido à variações na composição mineralógica da fração argila dos solos. COLEMAN et al. (1960) admitem que a fixação de fosfatos está relacionada com diversos constituintes dos solos, tais como: óxidos de ferro cristalizado е amorfos, óxidos de alumínio alumínio trocável. Consequentemente, várias reações podem ocorrer, simultaneamente ou não, dependendo dos teores relativos desses constituintes e das características dos solos. De acordo com FASSBENDER (1969), a matéria orgânica, em geral, não é apontada como responsável pelo processo de retenção de fósforo. Por outro lado, o efeito da matéria orgânica parece relacionada à sua interrelação com o conteúdo de argila dos solos e segundo HUSSAIN & KYUMA (1970) à sua ação complexante dos compostos de Fe e Al.

Baixas correlações foram encontradas entre a capacidade máxima de adsorção e os teores de Ca²⁺, Al³⁺, acidez potencial e pH. Na Tabela 6, percebe-se, ainda, que não houve uma relação clara entre a constante relacionada a energia de adsorção (K) e os constituintes dos solos.

De modo geral, estes resultados indicam a importância do conhecimento quantitativo e qualitativo dos componentes da fração argila, concordando com as afirmativas de COLEMAN et al. (1960) e TUCCI (1991).

4.2. Avaliação das fontes de fósforo

A avaliação dos fertilizantes fosfatados empregados no estudo, foi realizada com base na produção de matéria seca e fósforo absorvido pela parte aérea das plantas em cada cultivo.

4.2.1. Comparação dos fosfatos utilizados

Os fosfatos foram avaliados de acordo com o modelo estatístico proposto, e o resumo da análise de variância dos parâmetros produção de matéria seca e fósforo absorvido da parte aérea de caupi e arroz são apresentados nos

Apêndices 2 e 3. Percebe-se que houve efeito significativo em todas interações de solo, fonte e dose, em ambos cultivos, para os parâmetros estudados, com exceção para os efeitos de fontes e doses de fósforo, obtido na produção de matéria seca de arroz. Deste modo, os resultados da análise de variância não permitem a comparação isolada dos efeitos principais da análise.

Nas tabelas 7 e 8 são mostradas, respectivamente, as médias dos rendimentos de matéria seca e fósforo absorvido da parte aérea do caupi e arroz, em função da aplicação das fontes de fósforo nos solos utilizados.

Com relação à produção de matéria seca do caupi, verificou-se que em todos os solos o SFT proporcionou resultados significativamente mais elevados, que os demais fosfatos. Este resultado já era previsível, tendo em vista a alta solubilidade apresentada pelo SFT, e que provavelmente foi favorecida pela correção da acidez das amostras de solo, antes do plantio da cultura, reduzindo a fixação do P pelo, solo conforme mencionam GOEDERT et al., (1987); BALDEON (1986); GOEDERT & LOBATO (1980).

O termofosfato magnesiano fino (yoorin-f) apresentou a segunda melhor produção de matéria seca, para a maioria dos solos, com exceção dos LA médio e LA arg. que apresentaram resultados significativamente semelhantes aos obtidos pelo SFT. Diversos trabalhos têm evidenciado os resultados satisfatórios apresentados pelo termofosfato magnesiano, os quais, em várias ocasiões têm demonstrado ser tão eficiente quanto os fertilizantes solúveis em água (MUZILLI et al., 1971; BORKERT et al., 1978; GOEDERT & LOBATO, 1980 e 1984; GOEDERT et al., 1987; FEITOSA et al., 1978).

Tabela 7 - Produção de matéria seca (g/vaso) da parte aérea de caupi e arroz, em resposta à aplicação de fontes de fósforo, nos diferentes solos testados.

		cultu	ıra
solo	fonte de P	caupi	arroz
LA arg.	SFT	8,92 a*	7,10 a
	Yoorin-f	8,52 a	6,58 a
	Yoorin-g	5,91 b	6,40 a
	FNCN	5,43 b	6,56 a
LA m.arg.	SFT	8,28 a	7,68 b
	Yoorin-f	6,07 b	6,68 c
	Yoorin-g	3,28 c	7,03 bc
	FNCN	3,85 c	9,62 a
LA m.	SFT	9,46 a	5,97 a
•	Yoorin-f	9,33 a	6,12 a
	Yoorin-g	7,70 b	5,58 a
	FNCN	5,60 c	5,34 a
/ PV arg.	SFT	8,32 a	6,12 a
<u>-</u>	Yoorin-f	7,29 b	5,54 a
	Yoorin-g	4,22 c	5,32 ab
	FNCN	2,11 d	4,52 b
PV m.arg.	SFT	9,49 a	6,14 a
	Yoorin-f	6,27 b	5,75 a
	Yoorin-g	6,03 b	5,46 a
	FNCN	3,84 c	5,64 a

^{*} médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 8 - Conteúdo de fósforo absorvido (mg/vaso) da parte aérea de caupi e arroz, em resposta à aplicação de fontes de fósforo, nos diferentes solos testados.

		cultu	ıra
solo	fonte de P	caupi	arroz
LA arg.	SFT	25,16 a*	15,67 a
	Yoorin-f	26,71 a	13,27 b
	Yoorin-g	13,44 b	12,13 b
	FNCN	10,15 c	12,93 b
LA m.arg.	SFT	13,57 a	12,11 b
	Yoorin-f	10,92 a	11,24 bc
	Yoorin-g	5,24 b	10,36 c
	FNCN	6,07 b	14,48 a
LA m.	SFT	28,47 a	12,97 a
	Yoorin-f	26,32 a	11,80 a
	Yoorin-g	19,13 b	9,80 b
	FNCN	9,90 c	9,53 b
PV arg.	SFT	24,97 a	12,80 a
	Yoorin-f	18,33 b	10,58 b
	Yoorin-g	9,02 c	8,73 c
	FNCN	2,67 d	6,35 d
PV m.arg.	SFT	23,02 a	12,06 a
	Yoorin-f	13,22 b	9,31 b
•	Yoorin-g	14,20 b	8,84 b
	FNCN	7,40 c	9,39 b

^{*} médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados menos expressivos foram verificados para o termofosfato magnesiano yoorin-granular e o fosfato natural da Carolina do Norte (FNCN), sendo que este último foi o de menor rendimento, dentre os fosfatos estudados. Estes resultados demonstram que o tamanho das partículas destes produtos influenciou diretamente nas respostas das plantas. No caso do yooringranular, o efeito foi evidente, considerando que o produto apresenta características químicas semelhantes ao yoorin-fino, diferindo apenas na granulometria, concordando com os resultados obtidos por STEFANUTTI (1991). No caso do FNCN, os resultados obtidos não concordam com o que tem sido constatado na literatura, onde boas respostas das plantas são verificadas com a aplicação deste produto. Contudo, é provável que os baixos rendimentos de caupi sejam devido ao fosfato não ter sido aplicado na forma de pó, como frequentemente é utilizado. Este fato foi verificado por KANABO & GILKES (1988), que estudando o efeito do tamanho das partículas na eficiência do FNCN, observaram que a dissolução do fosfato aumentou, com a diminuição do tamanho das partículas.

Os rendimentos de matéria seca obtidos no cultivo de arroz (Tabela 7) demonstraram resultados bastante diferenciados daquele obtido no cultivo do caupi. Neste caso, a produção de matéria seca não diferiu estatisticamente entre as fontes, para a maior parte dos solos, exceção feita para o LA muito argiloso, onde o FNCN apresentou rendimento superior aos demais fosfatos e para o PV argiloso, onde o mesmo produto mostrou-se estatisticamente inferior aos demais. Alguns aspectos podem ser considerados para explicar o comportamento dos fosfatos neste cultivo, podendo ser mencionado: a redução da eficiência do superfosfato concentrado no segundo cultivo; o aumento da

eficiência das fontes de menor solubilidade; e as características da própria cultura, empregada no segundo cultivo.

De certa forma são conhecidos os efeitos da adubação fosfatada na sucessão de cultivos, onde se verificam efeitos imediatos no primeiro cultivo, após a adubação, e efeitos residuais nos cultivos subsequentes. O efeito residual de adubos fosfatados solúveis tende a diminuir com o passar do tempo, após a adubação (VOLKWEISS & RAIJ, 1977). SOUSA & VOLKWEISS (1987b), estudando o efeito residual do SFT em quatro cultivos sucessivos de milho-aveia, verificaram que em todos os tratamentos houve uma redução nos rendimentos relativos de matéria seca, durante a sucessão dos cultivos. Por outro lado, os fosfatos menos solúveis tendem a manifestar um melhor efeito sobre os rendimentos das culturas, após o primeiro cultivo, como mostram os resultados obtidos por GOEDERT & LOBATO (1980), onde vários fosfatos naturais brasileiros apresentaram baixíssima eficiência no primeiro cultivo, mas melhoraram sensivelmente com o tempo.

A forma e intensidade de resposta à adubação fosfatada estão estreitamente relacionadas a espécie vegetal utilizada (GOEDERT et al., 1987). Assim, determinadas espécies parecem atuar mais eficazmente na exploração do potencial produtivo dos solos, aproveitando melhor o fósforo existente. KHASAWNEH & DOLL (1978) assinalam que as diferenças entre as culturas na habilidade de utilizar fósforo, está relacionada a seu padrão de demanda para Ca e P, e como essa demanda altera a composição da solução do solo na interface soloraiz. DEAN & FRIED (1953) estudaram uma série de culturas e citaram o caupi como pouco eficiente para aproveitamento de fósforo, proveniente de fosfatos naturais. GOEDERT et al. (1987) consideram que algumas gramíneas como

milho, braquiária e capim andropógon parecem ser mais eficientes em utilizar o fósforo em solos sem adubação fosfatada. É provável que as plantas de arroz apresentem esse mesmo comportamento, pois, como se observa na Tabela 8, os dados de P absorvido pela parte aérea do arroz, demonstram que apesar de ter ocorrido maior absorção de fósforo nos solos que receberam aplicação de SFT, este efeito não foi traduzido em produção de matéria seca, não havendo diferença entre as fontes (Tabela 7).

Comparando-se o conteúdo de fósforo absorvido pela parte aérea do caupi (Tabela 8), observou-se um comportamento semelhante ao apresentado na produção de matéria seca, onde o SFT foi estatisticamente superior aos demais fosfatos.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados respectivamente os resultados médios de produção de matéria seca e P absorvido pelas plantas de caupi, obtidos nos diferentes solos estudados. Observa-se que, para ambos os parâmetros da planta, em todas as doses de fósforo, houve um efeito marcante do tipo de solo sobre os resultados. Tanto o Latossolo Amarelo muito argiloso, quanto o Podzólico Vermelho-Amarelo argiloso influenciaram negativamente os rendimentos da cultura, onde foram verificadas claramente as mais baixas produções de matéria seca e de P absorvido. Este comportamento pode ser atribuído à capacidade de fixação de fósforo deste solo, confirmando os resultados obtidos em laboratório, no estudo de adsorção de fósforo, onde foram constatados os valores mais elevados de capacidade máxima de adsorção, dentre os solos avaliados.

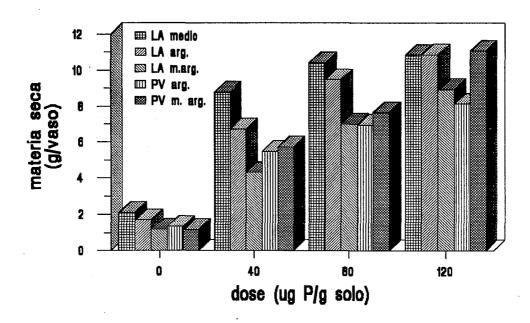


Figura 3 - Produção de matéria seca da parte aérea de caupi obtida nos diferentes solos, em função das doses de fósforo.

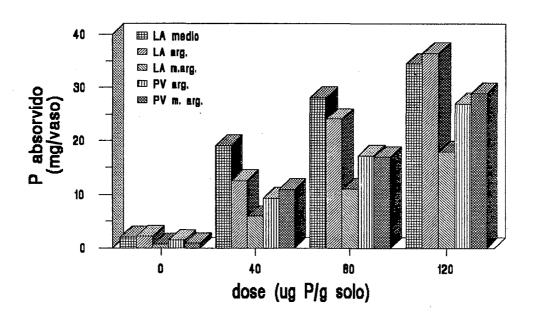


Figura 4 - P-absorvido pela parte aérea de caupi obtido nos diferentes solos, em função das doses de fósforo.

Vários trabalhos têm evidenciado que as diferenças entre solos no fornecimento de fósforo para as plantas estão intimamente relacionadas à sua capacidade de retenção de fosfatos (VOLK & MaCLEAN, 1963; NOVOA & NUNES, 1974; VOLKWEIS & RAIJ, 1977; GOEDERT & SOUSA, 1984; GONÇALVES, 1988), indicando que em solos com elevado potencial de fixação de fósforo, a disponibilidade do elemento para as plantas se torna pequena, refletindo em menor absorção do nutriente e conseqüentemente menor produção.

No segundo cultivo, o efeito dos tipos de solo sobre as plantas de arroz foi bastante variado, não mostrando alguma tendência mais nítida. Esses resultados podem ser devido ao revolvimento das amostras de solo nos vasos, após a colheita do primeiro cultivo.

4.2.2. Curvas de resposta dos diferentes fosfatos

Para avaliar os níveis de fósforo dos fosfatos aplicados ao solo, foram realizadas análises de regressão polinomial para os valores de P absorvido e matéria seca produzida pelas plantas de caupi e arroz (Apêndice 4 e 5). Como a análise de variância destes parâmetros revelou efeito significativo para todas as interações dos fatores, obtiveram-se curvas de resposta para produção de matéria seca de caupi e arroz, obtidas em função da aplicação dos fosfatos, nos diferentes tipos de solo.

Na cultura do caupi, a aplicação de doses crescentes de fósforo proporcionou efeitos diferenciados de resposta para as fontes, nos diferentes solos (Figuras 5 à 9). Percebe-se que, apesar de ter havido respostas sempre crescentes em todos os níveis de fósforo e solos, o comportamento dos fosfatos mais solúveis, como SFT e yoorin-fino, foi mais destacado que os demais, mostrando imediata disponibilidade do nutriente aplicado.

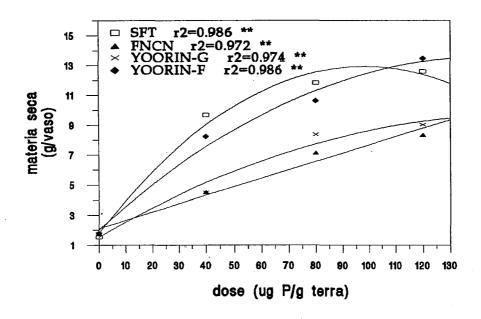


Figura 5 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg.

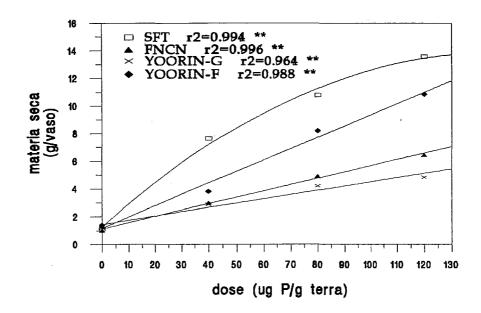


Figura 6 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg.

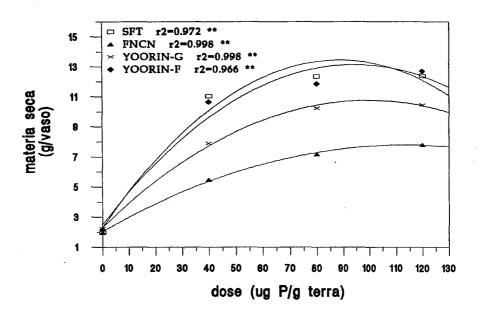


Figura 7 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo LA médio.

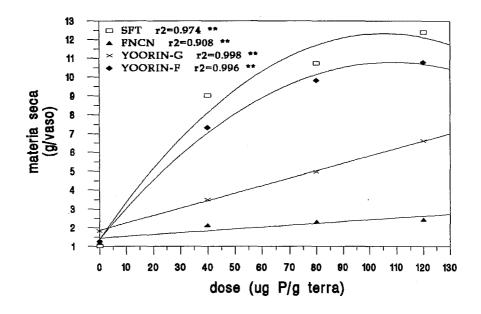


Figura 8 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV arg.

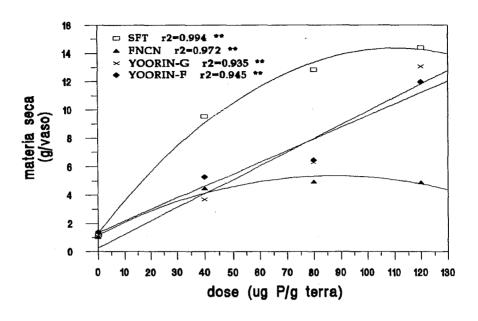


Figura 9 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de caupi em função da aplicação de fosfatos, no solo PV m.arg.

Ainda com relação a essas duas fontes de P, verificou-se que na maioria dos solos, o SFT mostrou-se superior ao yoorin-fino nos diversos níveis de aplicação. Este comportamento era previsível, devido à elevada solubilidade em água do superfosfato, que coloca rapidamente na solução do solo quantidades consideráveis de fósforo, para absorção pelas raízes das plantas. De acordo com RAIJ et al.(1981) e GOEDERT & LOBATO (1980) este tipo de resposta à adição de P, na forma de SFT, mostra uma curva típica de solos pobres em P nativo disponível para as plantas.

Na maioria dos solos, o comportamento do yoorin-granular e FNCN seguiu uma tendência semelhante, sendo que o primeiro apresentou maiores respostas à aplicação de doses crescentes. Todos estes resultados estão de acordo com as afirmações de GOEDERT & SOUSA (1986) e CHIEN et al.

(1990) que consideram a variação da eficiência das fontes de fósforo, basicamente, em função dos teores do nutriente solúvel em água, em citrato de amônio ou ácido cítrico. GOEDERT & LOBATO (1980) afirmam ainda, que a eficácia dos fertilizantes fosfatados pode ser estimada com base no conhecimento de sua solubilidade.

A resposta à aplicação de doses crescentes de fósforo, no cultivo do arroz, para os diferentes solos e fontes, é apresentada nas Figuras 10 a 14. Os dados demonstraram que houve efeito significativo de doses sobre a produção de matéria seca. Contudo, nota-se que o comportamento apresentado pelos fosfatos foi bastante semelhante em todos os solos, mostrando que neste cultivo houve uma similaridade dos resultados, devido, principalmente, à redução da resposta dos fosfatos de maior solubilidade e aumento considerável do efeito residual dos fosfatos menos solúveis.

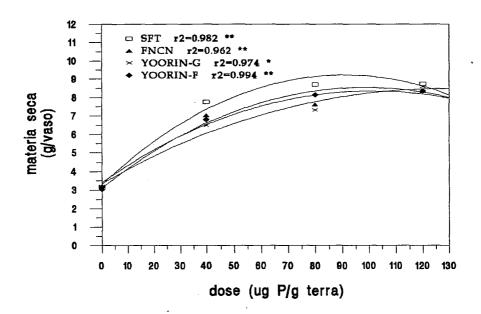


Figura 10 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA arg.

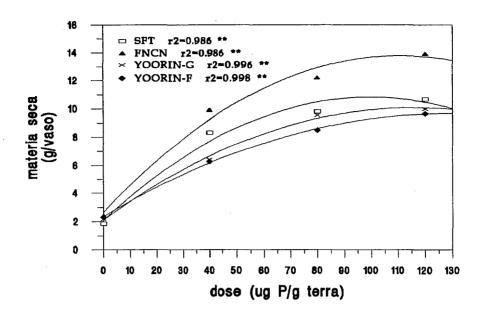


Figura 11 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.arg.

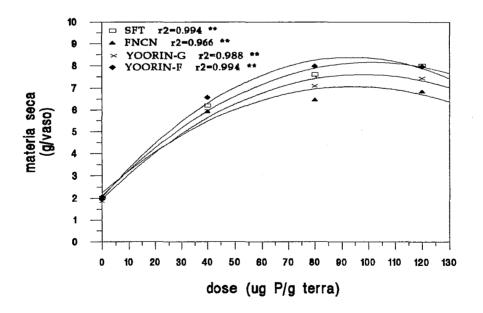


Figura 12 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo LA m.

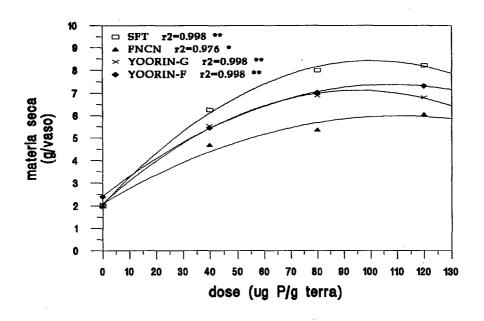


Figura 13 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo PV arg.

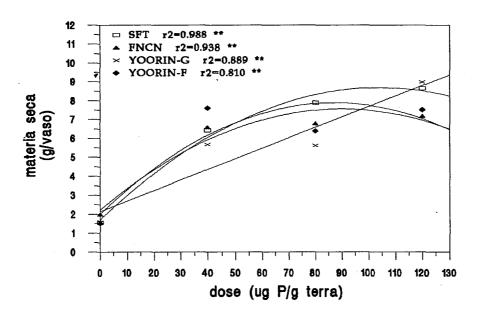


Figura 14 - Curvas de resposta para produção de matéria seca da parte aérea de arroz em função da aplicação de fosfatos, no solo PV m.arg.

4.2.3. Eficiência Agronômica dos fosfatos

A eficiência agronômica das fontes de P foi avaliada pelo Índice de Eficiência Agronômica (IEA), calculado com base na produção de matéria seca e teor de fósforo extraído pela parte aérea das plantas de caupi e arroz, utilizando a mesma dose de P₂O₅ total para todas as fontes e adotando o SFT como fonte de referência. Segundo GOEDERT & SOUSA (1986) este teste é rigoroso, tendo como princípio a utilização de plantas exigentes e de crescimento rápido, favorecendo as fontes mais solúveis. Os autores mencionam ainda, que o cálculo é simples, pois exige apenas uma dose de P aplicado, mas por isso, requer que esta dose esteja situada na faixa ascendente da curva de resposta da cultura.

Os índices de eficiência agronômica relativos aos dados de produção de matéria seca e fósforo absorvido, em função de fontes, doses e solos são apresentados nas tabelas 9 e 10, respectivamente.

Os índices obtidos através da produção de matéria seca da parte aérea do caupi mostraram que, em todos os solos, o termofosfato yoorin-fino apresentou eficiência superior ao termofosfato yoorin-granular e FNCN, chegando a igualar-se à do SFT (padrão), nas doses mais elevadas, nos LA argiloso e LA médio. Estes resultados concordam com os obtidos por diversos autores (DYNIA, 1977; GOEDERT & LOBATO, 1980; BRAGA et al., 1980; KORNDORFER, 1978; STEFANUTTI, 1991; OLIVEIRA et al., 1984), mostrando a elevada eficiência deste fosfato, sendo atribuída à sua solubilidade e ao efeito corretivo sobre a acidez do solo. ALCARDE & PONCHIO (1980) avaliando a caracterização da solubilidade da maioria dos fosfatos naturais brasileiros e de alguns termofosfatos, através da extração com ácidos orgânicos, concluíram que o termofosfato yoorin apresentou solubilidade relativamente

elevada, mesmo em solução neutra de citrato de amônio. O termofosfato magnesiano, além de fornecer cálcio e magnésio ao solo, tem mostrado um efeito corretivo da acidez (LOBATO, 1982; YOST et al., 1982), provavelmente, em virtude do seu conteúdo de silicato de magnésio (GOEDERT & LOBATO, 1980).

Os valores de IEA obtidos pelo termofosfato yoorin-granular foram bastante inferiores aos obtidos pelo yoorin-fino, mostrando que a diferença entre os resultados apresentados por estes produtos, ocorreu em função da granulometria, caracterizando a rápida liberação de fósforo para as plantas do termofosfato com partículas de menor tamanho. Estes resultados concordam com os obtidos por STEFANUTTI (1991), que comparou três diferentes granulometrias do termofosfato yoorin, constatando aumento de eficiência do produto à medida que diminuiu a sua granulometria.

O fosfato da Carolina do Norte apresentou os menores índices de eficiência agronômica no cultivo do caupi, assemelhando-se ao comportamento dos fosfatos naturais brasileiros citados em diversos trabalhos (GOEDERT & SOUSA, 1986; GOEDERT et al., 1990; FERREIRA & KAMINSKI, 1979; FEITOSA et al., 1978), que mencionam a baixa eficiência destes produtos em relação às fontes com elevada solubilidade em água. Entretanto, estes resultados discordam dos obtidos por BARNES & KAMPRATH (1975), que em experimentos de campo, em solos orgânicos, observaram que a resposta à rocha fosfatada, medida em termos de produção e absorção de P pelo milho, soja e trigo, foi equivalente àquela obtida com superfosfato.

Tabela 9- Índice de eficiência agronômica (%) obtido através dos resultados de produção de matéria seca de plantas de caupi e arroz, em função de solos, fontes e doses.

		1° c	ultivo (cau	pi)	2° (cultivo (arr	oz)
solo	dose	FNCN	Yoorin-g	Yoorin-f	FNCN	Yoorin-g	Yoorin-f
LA arg.	40	34	34	8 0	82	7 2	82
	80	53	65	86	7 9	75	82
	120	59	66	106	91	97	95
LA m.arg.	40	30	26	37	115	65	61
	80	40	31	7 0	123	93	78
	120	44	29	76	131	89	84
LA m.	40	39	62	94	92	98	110
	80	50	77	94	78	93	107
	120	56	78	101	7 9	93	100
PV arg.	40	12	21	75	64	82	72
	80	12	32	88	56	80	77
	120	14	42	84	65	7 6	7 9
PV m.arg.	40	41	32	47	95	84	125
	80	34	45	44	7 6	64	77
	120	29	91	80	7 3	105	85

Tabela 10- Índice de eficiência agronômica (%) obtido através do fósforo absorvido pela parte aérea de caupi e arroz, em função de solos, fonte e doses.

		1° cultivo (caupi)			2º cultivo (arroz)		
solo	dose	FNCN	Yoorin-g	Yoorin-f	FNCN	Yoorin-g	Yoorin-f
LA arg.	40	39	49	92	85	66	73
	80	42	51	98	7 3	72	92
	120	26	49	108	7 6	72	82
LA m.arg.	40	32	28	61	117	70	68
	80	62	44	94	114	87	89
	120	37	33	78	115	80	96
LA m.	40	27	56	91	86	7 9	91
	80	30	81	94	7 2	7 9	93
	120	34	57	91	56	64	85
PV arg.	40	13	26	7 9	66	94	104
	80	7	20	64	40	62	7 6
	120	6	26	72	39	52	68
PV m.arg.	40	61	52	84	109	7 6	147
	80	34	46	49	69	49	53
	120	18	72	51	63	87	64

Outros autores têm relatado a eficiência relativa do fosfato da Carolina do Norte. HAMMOND & LÉON (1992), avaliando este fosfato natural, relatam sua alta eficiência agronômica, assinalando que esta rocha é a mais solúvel que se encontra na atualidade. ENGLESTAD et al. (1974), estudando o efeito do pH do solo sobre a efetividade de vários fosfatos naturais, na Tailândia e Índia, verificaram que o fosfato da Carolina do Norte apresentou maior eficiência que as rochas de baixa reatividade em diferentes condições de pH. CHIEN & HAMMOND (1978) avaliaram o potencial agronômico de sete fosfatos de rocha, em solos ácidos colombianos, e constataram que o fosfato da Carolina do Norte não apresentou bons rendimentos de feijão, no primeiro cultivo, sendo inferior ao SFT e ao fosfato de Gafsa. Contudo, nos segundo e terceiro cultivos houve uma melhora considerável no rendimento de grãos do feijão, nos tratamentos com aplicação do fosfato da Carolina do Norte, mostrando que o efeito residual deste produto deve ser levado em consideração na seleção de fosfatos de rocha, para aplicação direta na agricultura.

Os resultados dos IEA, relativos à produção de matéria seca, obtidos no cultivo do arroz, concordam com os obtidos por CHIEN & HAMMOND (1978), mostrando que o efeito residual do fosfato da Carolina do Norte tende a equiparar-se às fontes mais solúveis, como o termofosfato yoorinfino. Os resultados demonstraram ainda que os índices relativos ao termofosfato yoorin- granular aumentaram substancialmente em relação aos obtidos no primeiro cultivo, confirmando que a granulometria dificultou, inicialmente, a mais rápida liberação do fósforo para as plantas.

Os valores dos IEA obtidos a partir do conteúdo de fósforo absorvido pela parte aérea das plantas de caupi e arroz (Tabela 10), foram

bastante semelhantes aos valores apresentados para produção de matéria seca, evidenciando que ambos os parâmetros discriminaram satisfatoriamente a eficiência agronômica dos fosfatos.

4.3. Avaliação da eficiência dos extratores

4.3.1. Teores de fósforo nos solos

Para avaliar a capacidade extratora, nas duas épocas de amostragem (semeadura do caupi e do arroz) dos vários métodos testados, realizou-se análise estatística com auxílio do teste F, para valores de P extraído, em função dos tipos de solo, fontes e doses de fósforo (Apêndices 6-10).

As comparações dos teores médios de P extraído, obtidos em amostras de solo coletadas antes da semeadura do caupi e do arroz, pelos métodos da resina, Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-I e papel de filtro (apenas no segundo cultivo), são apresentadas nas Tabelas 11 a 15.

Os resultados demonstraram que, em termos médios, os teores de fósforo do solo variaram de acordo com os fosfatos aplicados, tipos de solos e extratores utilizados. De modo geral, os teores de fósforo, obtidos pelos extratores nas duas amostragens realizadas, refletiram as características de solubilidade dos fosfatos empregados.

Independentemente do tipo de solo, observou-se que os fratamentos que receberam aplicação de SFT e termofosfato yoorin-fino, apresentaram teores mais elevados de fósforo no solo, pelos diferentes extratores em ambas amostragens. Estes resultados estão coincidindo com os dados de

produção de matéria seca e P-absorvido, apresentados anteriormente, onde o SFT e o termofosfato yoorin-fino proporcionaram também tendências semelhantes às obtidas pelos teores de fósforo do solo, nos respectivos tratamentos. CAJUSTE & KUSSOW (1974) assinalam que a maior parte do fósforo absorvido pelas culturas advêm de compostos secundários, formados da reação solo-fertilizante, embora o papel destas diferentes formas de fósforo do solo não estejam perfeitamente estabelecido na nutrição mineral das plantas.

Tabela 11 - Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras de LA arg. coletadas na semeadura do caupi e arroz, em função das fontes de fósforo.

amostragem		P-extraido (μg P/g solo)				
na semeadura	fontes de P	resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	P. filtro
caupi	SFT	44,35 a	37,65 bc	35,84 b	34,16 a	
	Yoorin-f	37,72 ab	53,96 ab	46,63 a	22,65 b	-
	Yoorin-g	34,21 ab	34,49 c	16,09 с	5,30 c	
	FNCN	26,04 b	64,08 a	12,23 с	4,32 c	
	média	35,58	47,54	27,70	16,61	-
arroz	SFT	17,86 b	24,09 b	27,06 a	16,27 a	27,50 b
	Yoorin-f	16,32 b	20,93 bc	26,00 a	13,24. b	27,68 b
	Yoorin-g	29,44 a	15,66 с	16,16 b	8,18 c	23,65 b
	FNCN	14,01 b	48,92 a	15,01 b	6,48 d	37,65 a
	média	19,41	24,40	21,06	11,04	29,12

^{*} médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de significância.

Tabela 12 - Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras de LA m. arg. coletadas na semeadura do caupi e arroz, em função das fontes de fósforo.

amostragem		P-extraido (μg P/g solo)				
na semeadura	fontes de P	resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	P. filtro
caupi	SFT	54,50 b	44,28 c	36,47 b	28,72 a	-
	Yoorin-f	46,69 b	71,24 b	48,35 a	23,90 a	-
	Yoorin-g	119,47 a	34,84 c	19,62 c	3,82 b	-
	FNCN	40,24 b	112,73 a	13,04 с	3,57 b	.
	média	65,23	65,73	29,37	15,00	-
arroz	SFT	18,20 bc	19,56 b	15,44 ab	12,19 a	21,46 с
	Yoorin-f	15,91 c	17,03 b	18,01 a	11,07 a	28,66 bc
	Yoorin-g	30,05 a	17,34 b	14,87 b	6,70 b	32,64 ab
	FNCN	25,38 ab	55,44 a	14,51 b	5,83 b	38,94 a
	média	22,38	27,34	15,71	8,95	30,34

^{*} médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de significância.

Tabela 13 - Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras de LA m. coletadas na semeadura do caupi e arroz, em função das fontes de fósforo.

amostragem			P-e	xtraido (µg]	P/g)	
na semeadura	fontes de P	resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	P. filtro
caupi	SFT	29,03 a	33,46 b	34,76 a	32,89 a	-
	Yoorin-f	27,78 a	53,84 a	42,41 a	21,16 b	-
	Yoorin-g	33,77 a	33,64 b	20,35 b	3,77 c	-
	FNCN	10,31 b	62,39 a	10,45 c	2,46 c	-
	média	25,22	45,83	26,99	15,07	_
arroz	SFT	19,57 a	28,30 bc	26,29 a	20,92 a	33,04 a
	Yoorin-f	18,31 a	30,44 b	27,83 a	15,99 b	34,20 a
	Yoorin-g	24,46 a	20,60 c	13,87 b	5,78 c	17,57 b
	FNCN	17,27 a	51,34 a	13,15 b	4,10 d	37,83 a
	média	19,90	32,67	20,28	11,70	30,66

^{*} médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de significância.

Tabela 14 - Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras de PV arg. coletadas na semeadura do caupi e arroz, em função das fontes de fósforo.

amostragem		P-extraido (μg P/g)				
na semeadura	fontes de P	resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	P. filtro
caupi	SFT	38,07 a	35,29 b	31,64 a	30,15 a	-
•	Yoorin-f	42,37 a	50,21 b	37,84 a	23,03 b	-
	Yoorin-g	44,69 a	35,11 b	20,54	4,31 c	-
	FNCN	18 <u>,</u> 70 b	83,64 a	8,92 c	3,48 c	-
	média	35,96	51,06	24,74	15,24	-
arroz	SFT	23,66 ab	23,92 bc	25,41 a	18,51 a	37,51 b
	Yoorin-f	18,42 b	27,44 b	27,78 a	10,91 b	27,23 c
	Yoorin-g	27,63 a	17,73 c	15,52 b	6,07 c	23,20 с
	FNCN	24,67 ab	55,58 a	12,47 c	2,88 d	60,49 a
	média	23,59	31,17	20,30	9,59	37,11

^{*} médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de significância.

Tabela 15 - Teores médios de P extraído pelos diferentes extratores, em amostras de PV m arg. coletadas na semeadura do caupi e arroz, em função das fontes de fósforo.

amostragem		P-extraido (μg P/g)				
na semeadura	fontes de P	resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	P. filtro
caupi	SFT	24,71 ab	23,62 с	23,37 b	18,14 a	-
	Yoorin-f	30,69 a	36,84 bc	23,23 b	10,41 b	-
	Yoorin-g	33,30 a	46,43 ab	35,02 a	12,11 b	-
	FNCN	11,04 b	62,44 a	11,49 c	1,81 c	-
	média	24,94	42,33	23,28	10,62	-
arroz	SFT	16,99 ab	26,65 b	23,03 a	14,48 a	28,97 b
	Yoorin-f	22,28 ab	20,26 b	16,84 b	7,60 c	26,42 b
	Yoorin-g	23,81 a	27,40 b	21,32 a	9,37 b	31,87 b
	FNCN	14,64 b	60,61 a	16,16 b	3,51 d	65,14 a
	média	19,43	33,73	19,34	8,74	38,11

^{*} médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de significância.

Nas condições do experimento, verificaram-se comportamentos específicos de determinados métodos, em relação à sua ação extratora sobre o fósforo do solo.

Os teores de P no solo, obtidos pelo método da resina, apresentaram certa coerência com respostas das plantas, em termos de produção de matéria seca e P-absorvido. O mesmo não foi observado para os teores médios de P-extraido em amostras de solo tratadas com termofosfato yoorin-granular, que apresentaram teores elevados do elemento nos vários solos estudados, assemelhando-se e em alguns casos superando os tratamentos que receberam aplicação dos fosfatos de maior solubilidade. Estes resultados podem ser justificados por uma possível interação de solo com o termofosfato yoorin na forma granular, favorecendo maior remoção de fósforo, pela resina, pois, verificase que este comportamento foi mais acentuado nos solos de maior capacidade de retenção de fósforo, como é o caso do solo LA m.arg. e PV arg. (Tabela 5).

Em todos os solos e época de amostragem, o extrator Mehlich-1 apresentou a maior capacidade de extração de fósforo nas amostras de solo tratadas com fosfato natural da Carolina do Norte, mostrando a ação enérgica de extração deste método sobre os constituintes de solos que possuem resíduos inalterados de fosfato natural. Resultados semelhantes têm sido relatados por diversos autores (FEITOSA & RAIJ, 1976; GOEDERT & LOBATO, 1980; BAHIA FILHO et al., 1982; BARBOSA FILHO et al., 1987). Segundo THOMAS & PEASLEE (1973) os extratores ácidos possuem a propriedade de aumentar a solubilidade de fosfatos básicos do solo, como a apatita, nativos ou adicionados, superestimando os teores de fósforo que estariam teoricamente disponíveis para as plantas. Os resultados obtidos enquadram-se nas afirmações

destes últimos autores, tendo em vista que as respostas das plantas de caupi e arroz não foram coerentes com os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1. Mesmo na amostragem realizada antes da semeadura do arroz, os teores de P extraído pelo extrator, foram ainda bastante elevados, não havendo correspondência com a resposta das plantas à aplicação do fosfato da Carolina do Norte, que apesar de ter apresentado um bom efeito residual, não chegou a superar, na maioria dos casos, as respostas da planta à aplicação dos fosfatos mais solúveis. Para os demais tratamentos com aplicação de SFT, yoorin-fino e yooringranular, os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 não demonstraram tendência diferente dos resultados apresentados pelos outros extratores.

Os teores de fósforo do solo obtidos pelo extrator Mehlich-3 apresentaram boa correspondência com as respostas biológicas das plantas de caupi e arroz, mostrando que em todos os solos estudados, foi o método que mais se adequou às variações observadas pelos dados de produção de matéria seca e P absorvido (Tabelas 7 e 8), em resposta à aplicação das fontes de fósforo testadas.

Com relação aos teores de fósforo extraído pelo método Bray-I, em termos gerais, verificou-se valores bastante inferiores aos apresentados pelos demais extratores, principalmente nos solos tratados com termofosfato yooringranular e fosfato natural da Carolina do Norte, onde foram observados os mais baixos teores de fósforo no solo. Estes resultados parecem envolver uma combinação de efeitos, já que o método tem amplo emprego na determinação de fósforo disponível em solos. A associação de HCl e NH₄F é adequada para dissolver formas de fósforo facilmente solúveis em ácidos, conforme menciona KAMINSKI (1983). Embora seja um extrator considerado ácido, não dissolve porções significativas de fosfatos de rocha, como tem sido assinalado por alguns

autores (CHIEN, 1978; SMITH et al., 1957; RAIJ & DIEST, 1980). Assim, era de se esperar que a ação extratora deste método, sobre os tratamentos com aplicação de fosfato da Carolina do Norte, fosse menos acentuada que a dos demais métodos. Entretanto, percebe-se que as diferenças nos teores de fósforo entre os solos tratados com os fosfatos de maior solubilidade (SFT e yourin-fino) e os menos solúveis (yoorin-granular e FNCN) foram bastante contrastantes, evidenciando que algum efeito adicional pode ter afetado os resultados. Este efeito pode estar relacionado a aplicação de calcário, efetuada no início do experimento, promovendo o enfraquecimento do poder extrativo dos reagentes, conforme mencionam BRAGA & DEFELIDO (1972) e BARBOSA FILHO et al. (1987). Também, segundo os autores, pode ter havido hidrólise dos fosfatos de alumínio e ferro, seguindo-se uma precipitação do fósforo sob a forma de fosfato tricálcico. Um outro aspecto que reforça a hipótese da ação do calcário é que justamente nos tratamentos que receberam aplicação de termofosfato yooringranular e de fosfato natural, os teores de fósforo aumentaram do primeiro para o segundo cultivo, em todos os solos testados, mostrando que com a redução do efeito da calagem a ação do extrator foi mais enérgica.

O método do papel de filtro impregnado com óxido de ferro foi introduzido, neste trabalho, com a intenção de realizar uma breve avaliação do seu comportamento, nas condições de solo e fontes utilizadas. Assim o método foi empregado apenas nas amostras de solo coletadas na semeadura do arroz, tendo os seus valores de P-extraido apresentados nas tabelas 11 a 15. Observou-se que o comportamento do método do papel de filtro, frente a aplicação dos diferentes fosfatos, foi semelhante ao do Mehlich-1, tendo inclusive apresentado teores elevados de fósforo, nos solos tratados com fosfato natural. Estes resultados

discordam da maioria dos trabalhos encontrados na literatura internacional, onde o método tem sido avaliado principalmente em condições de solos ácidos. MENON et al. (1989a) e MENON et al. (1990a) verificaram que as quantidades de fósforo extraídas pelo extrator Bray-I foram muito maiores que as obtidas pelo método do papel de filtro, em solos tratados com vários fosfatos naturais da África e América Latina. MENON et al. (1988) observaram que o fósforo extraído pelo papel de filtro, em solos tratados com SFT, foi aproximadamente semelhante ao extraído pelo método Olsen, sendo que os extratores ácidos extraíram significativamente largas quantidades de fósforo do solo. Os autores mencionam, ainda, que o Bray-I extraiu de 50 a 100% mais fósforo que o método de Olsen. Contudo, LIN et al. (1991), avaliando 39 solos de Taiwan, obtiveram elevados valores de fósforo extraído do solo pelo método do papel de filtro, em relação ao Bray-I, e em alguns casos, assemelhando-se aos teores obtidos pela resina-HCO₃. De modo geral, observa-se que os dados apresentados nos vários trabalhos existentes na literatura, demonstram uma certa variabilidade nos teores de fósforo extraído pelo método de papel de filtro, provavelmente ocasionada pelas variações nas condições de solo e fontes de fósforo. Um aspecto que foi observado em todos os trabalhos citados, relaciona-se ao fato dos solos terem sido usados naturalmente, sem correção da acidez, já que a maioria eram solos ácidos à ligeiramente ácidos. Este fato pode ter sido causador das diferenças na capacidade extratora do método do papel de filtro, entre os resultados dos trabalhos mencionados anteriormente e os obtidos no presente estudo, já que neste, foi efetuada aplicação de calcário para corrigir a acidez natural dos solos.

Em termos médios, verificou-se que houve diminuição nos teores de fósforo em todos os solos estudados, das amostras coletadas antes da

semeadura do caupi para aquelas coletadas antes da semeadura do arroz. Este fato pode ser explicado pela exportação de fósforo pelas plantas de caupi, promovendo a remoção de quantidades consideráveis do nutriente através da matéria seca. Outro aspecto que pode ser considerado, relaciona-se a transformação do fósforo disponível à formas de maior estabilidade que são de dificil extração, até mesmo pelos extratores.

4.3.2. Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de caupi e arroz.

Foram realizados estudos de correlação entre as quantidades de fósforo extraído pelos extratores e as respostas das plantas em produção de matéria seca e P absorvido da parte aérea de caupi e arroz, utilizando-se o modelo linear como padrão matemático para comparação, e agrupando-se os dados por fontes de fósforo e tipos de solo.

4.3.2.1. Correlação entre as quantidades de P extraído pelos extratores e as respostas das plantas de caupi e arroz, considerando os fosfatos utilizados.

Nas Tabelas 17 e 18 encontram-se os coeficientes de correlação obtidos entre o P-extraído através do método da resina, Mehlich-1, Mehlich-3, Bray-I e papel de filtro (Pi), com produção de matéria seca e P-absorvido, respectivamente, pela parte aérea das plantas de caupi e arroz, para cada um dos fosfatos utilizados. Os resultados demonstram que as fontes de fósforo, empregadas no experimento, influenciaram significativamente as correlações obtidas pelos diferentes métodos, principalmente para os parâmetros das plantas de caupi (Tabela 17).

Tabela 17 - Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de caupi, em matéria seca e P-absorvido, considerando as fontes de fósforo empregadas.

	coeficiente de correlação (r)			
Método	matéria seca	P-absorvido		
	Superfosfato triplo			
resina	0,742 **	0,755 **		
Mehlich-1	0,748 **	0,758 **		
Mehlich-3	0,774 **	0,809 **		
Bray-I	0,751 **	0,844 **		
Fos	fato natural da Carolina do No	orte		
resina	0,524 **	0,467 **		
Mehlich-1	0,540 **	0,521 **		
Mehlich-3	0,736 **	0,700 **		
Bray-I	0,236 ^{NS}	0,201 ^{NS}		
	Termofosfato yoorin-granular			
resina	0,305 *	0,256 *		
Mehlich-1	0,753 **	0,728 **		
Mehlich-3	0,705 **	0,690 **		
Bray-I	0,568 **	0,547 **		
	Fosfato yoorin-fino			
resina	0,683 **	0,680 **		
Mehlich-1	0,790 **	0,737 **		
Mehlich-3	0,825 **	0,828 **		
Bray-I	0,826 **	0,785 **		

^{*} significância ao nível de 5% de probabilidade

^{**} significância ao nível de 1% de probabilidade

^{NS} não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 18 - Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de arroz, em matéria seca e P-absorvido, considerando as fontes de fósforo empregadas.

	coeficiente de correlação (r)	
Método	matéria seca	P-absorvido
	Superfosfato triplo	
resina	0,722 **	0,898 **
Mehlich-1	0,720 **	0,901 **
Mehlich-3	0,714 **	0,926 **
Bray-I	0,681 **	0,889 **
Papel-filtro (Pi)	0,669 **	0,879 **
Fosf	ato natural da Carolina do No	orte
resina	0,551 **	0,582 **
Mehlich-1	0,653 **	0,739 **
Mehlich-3	0,684 **	0,797 **
Bray-I	0,757 **	0,871 **
Papel-filtro (Pi)	0,420 **	0,515 **
	Cermofosfato yoorin-granular	•
resina	0,609 **	0,697 **
Mehlich-1	0,683 **	0,767 **
Mehlich-3	0,716 **	0,797 **
Bray-I	0,679 **	0,759 **
Papel-filtro (Pi)	0,806 **	0,827 **
	Termofosfato yoorin-fino	
resina	0,627 **	0,683 **
Mehlich-1	0,716 **	0,836 **
Mehlich-3	0,741 **	0,875 **
Bray-I	0,750 **	0,867 **
Papel-filtro (Pi)	0,802 **	0,893 **

^{**} significância ao nível de 1% de probabilidade

Nos tratamentos que receberam aplicação de SFT foram obtidos elevados coeficientes de correlação para todos os extratores, tanto no cultivo do caupi, quanto do arroz. Estes resultados indicam que quando são utilizados fertilizantes mais solúveis, nas adubações, e as reações solo-fertilizante são quase que totalmente completadas, tanto a resina quanto os métodos de extração ácida (Mehlich-1, Mehlich-2, Bray-I e papel de filtro), podem ser utilizados satisfatoriamente, concordando com os resultados obtidos por outros autores (KAMINSKI, 1983; BARBOSA FILHO, 1986; BALDEON, 1986; OLIVEIRA, 1986).

Quando foi utilizado o fosfato natural da Carolina do Norte, os coeficientes de correlação passaram a refletir o comportamento específico dos métodos testados, sobre solos tratados com fosfato de rocha. Observou-se que os coeficientes de correlação obtidos pelo Mehlich-3, para produção de matéria seca e P-absorvido pelas plantas de caupi, foram consideravelmente superiores aos dos demais métodos, demonstrando a eficiência do extrator em solos que receberam aplicações recentes de fosfatos contendo minerais de apatita. Estes resultados parecem confirmar os observações de MEHLICH (1984), que atribuiu ao ácido acético uma decomposição mais moderada da apatita, sendo em menor grau que a decomposição conseguida pelos ácidos minerais equivalentes, encontrados em outros extratores.

Como era de se esperar, o extrator Mehlich-1 não apresentou altos coeficientes de correlação, neste caso, onde os solos foram tratados com fosfatos de rocha, mostrando que a elevada capacidade extratora do método, promoveu a remoção de altas quantidades de P do solo, sem a devida correspondência com a resposta biológica das plantas de caupi e arroz. Esta

restrição do extrator Mehlich-1 tem sido assinalada por vários autores (FEITOSA & RAIJ, 1976; GOEDERT e LOBATO; 1980, RAIJ; 1978, RAIJ et al., 1982; CABALA & SANTANA, 1983). De acordo com KAMPRATH & WATSON (1980) os extratores ácidos extraem mais fósforo ligado ao cálcio e apenas pequena proporção ligado ao alumínio e ferro. Quando são adicionados aos solos fosfatos de baixa solubilidade, onde as partículas do produto não sofreram completa dissolução no solo, o extrator Mehlich-1 pode extrair quantidades de fósforo superiores aquelas consideradas disponíveis (BARNES & KAMPRATH, 1975; DOLL et al., 1960), superestimando os teores de fósforo no solo. Além disso, a ação enérgica do extrator impede a readsorção do fósforo do solo dissolvido pelas soluções ácidas, durante o processo de extração (KAMPRATH & WATSON, 1980; BARBOSA FILHO et al., 1987). Com relação aos coeficientes de correlação apresentados pelo método da resina, foram observados valores nos mesmos níveis aos obtidos pelo Mehlich-1, indicando que apesar de ter havido certa correspondência entre os dados de P-extraído do solo pela resina com os parâmetros da planta, nem sempre retratam uma boa correlação mensurável através de um modelo matemático. Dentre os extratores testados, o Bray-I apresentou as mais baixas correlações entre o P-extraído e as respostas da planta, nos solos tratados com fosfato natural (Tabela 15). Estes resultados discordam de alguns autores (RAIJ & DIEST, 1980; McLEAN & LOGAN, 1970; KAMINSKI, 1983) que obtiveram boas correlações entre o P-absorvido pela planta e o Pextraído do solo pelo Bray-I, considerando-o como um dos mais adequados para estimativas do fósforo disponível em solos que receberam fertilização com fosfatos de diferentes natureza. De acordo com SMITH et al. (1957), o extrator Bray-I distingue, com certa versatilidade, solos que foram tratados com fosfato

natural, daqueles que receberam aplicação de fosfatos solúveis. Os autores mencionam, ainda, que as porções do fosfato natural não dissolvidas nos solos, não foram atingidas pelo extrator. Analisando-se os teores de fósforo nos solos, apresentados anteriormente nas Tabelas 11 a 15, verificou-se que as baixas correlações do método com os parâmetros da planta, foram devidas, principalmente, à sua baixa capacidade de extração de fósforo, nos tratamentos com fosfato natural da Carolina do Norte. Assim sendo, percebe-se que os resultados não diferiram totalmente dos obtidos por SMITH et al. (1957), pois o método distinguiu, com bastante rigidez, os solos tratados com fosfato natural, dos demais tratamentos. Além das justificativas discutidas no item 4.3.1, com relação a este extrator, o tempo da reação solo-fertilizante parece ter influência sobre a extração de fósforo do solo, pelo método. CHIEN (1978) estudando o papel do Bray-I na avaliação do fósforo disponível em solos ácidos tratados com fosfato de rocha, verificou que o teor de fósforo extraído, pelo método, aumentou à medida que aumentou o tempo de reação do fosfato da Carolina do Norte com o solo. O autor observou que, no momento zero de aplicação do fosfato, a quantidade de fósforo extraído representou apenas 7,9% do total aplicado, indicando que o extrator exige um certo tempo, para que o sistema solofertilizante atinja determinado equilíbrio, para uma extração mais compatível com as quantidades absorvidas pelas plantas. Assim sendo, é provável que as baixas correlações obtidas no presente trabalho, com o extrator Bray-I, sejam devido às plantas estarem removendo fósforo diretamente do fosfato recém aplicado, antes que este passe para a forma P-solução e desta para forma P-lábil, enquanto que o extrator parece retirar o fósforo mais ligado a estas formas.

Com respeito às correlações obtidas pelos extratores, nos solos que receberam termofosfato voorin-granular, foram observados bons coeficientes para os extratores Mehlich-1 e Mehlich-3. Os valores dos coeficientes de correlação obtidos pelo extrator Bray-I foram considerados intermediários, enquanto que os obtidos pelo método da resina foram considerados baixos. As baixas correlações observadas no método da resina, nos solos tratados com este fosfato, podem ser devidas, principalmente, às altas quantidades de fósforo removidas do solo durante o processo de extração, não possuindo relação muito clara com o fósforo absorvido pelas plantas de caupi, que retiraram quantidades consideravelmente inferiores do nutriente. A baixa eficiência do método pode estar associado com o seu próprio princípio. BACHE e IRELAND (1980) estudando as curvas de dessorção de fósforo em solo, observaram que o fósforo adsorvido pela resina é função do tempo de agitação, da quantidade de resina, da concentração de sais, da dessorção aniônica, do pH e das concentrações de cálcio e fósforo em solução. É provável que o pH e o tempo de agitação tiveram um papel importante para remoção do fósforo neste caso específico, onde os solos que foram tratados com termofosfato yoorin na forma granular. O efeito do pH e do íon bicarbonato foram estudados por RAIJ et al. (1986), que constataram a eficiência da resina em extrair elevadas quantidades de fósforo do extrato de resina-suspensão do solo, a valores de pH mais elevados (6,5 a 7,0). A presença do íon bicarbonato na superficie da resina aniônica, tampona o meio e favorece ainda mais a extração de fósforo. Considerando que o tamanho das partículas do produto tenha dificultado a sua mais rápida dissolução, evitando a adsorção na superficie dos solos, o tempo de agitação (16 horas) pode ter contribuído para maior remoção do fósforo diretamente do fosfato.

De modo geral as correlações observadas entre os extratores e os parâmetros das plantas de arroz (Tabela 18), demonstraram que aumentando o tempo de equilíbrio das reações solo-fertilizante, ocorreu uma sensível melhora na eficiência dos métodos em predizer o estado do fósforo no solo. Contudo, verificou-se que o método do Papel de filtro, nos solos com fosfato natural da Carolina do Norte, não apresentou correlações tão boas, quanto as observadas nos solos tratados com os demais fertilizantes. Isso demonstra, que a ação extratora do método pode ser influenciada por resíduos inalterados de fosfato de rocha, ocasionando a remoção de fósforo do solo, que não encontra-se à disposição das plantas.

4.3.2.2. Correlação entre as quantidades de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de caupi e arroz, considerando os tipos de solos.

Diversos fatores que interagem no sistema solo-plantafertilizante, podem influenciar o processo de extração alterando a eficiência de determinados extratores em predizer as quantidades de fósforo "disponível" para as plantas. De acordo com KAMPRATH & WATSON (1980) o método ideal para análise de fósforo do solo, seria aquele que não fosse influenciado por diferenças nas propriedades químicas e mineralógicas do solo.

Deste modo, para avaliar a sensibilidade dos métodos de extração de fósforo nos solos utilizados, os dados foram agrupados por tipos de solo, e as correlações entre os teores de P-extraído e as respostas das plantas são apresentadas nas Tabelas 19 e 20, respectivamente para caupi e arroz.

Tabela 19 - Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de caupi, em matéria seca e P-absorvido, considerando os solos utilizados.

	coeficiente de correlação (r)						
Método	matéria seca	P-absorvido					
Latossolo Amarelo-argiloso							
resina	0,877 **	0,887 **					
Mehlich-1	0,707 **	0,675 **					
Mehlich-3	0,827 **	0,947 **					
Bray-I	0,747 **	0,835 **					
	Latossolo Amarelo muito argiloso						
resina	0,374 **	0,439 **					
Mehlich-1	0,503 **	0,553 **					
Mehlich-3	0,839 **	0,887 **					
Bray-I	0,846 **	0,859 **					
	Latossolo Amarelo-médio						
resina	0,694 **	0,765 **					
Mehlich-1	0,566 **	0,558 **					
Mehlich-3	0,781 **	0,890 **					
Bray-I	0,663 **	0,810 **					
· .	Podzólico Vermelho-Amarelo argiloso						
resina	0,682 **	0,688 **					
Mehlich-1	0,209 **	0,207 ^{NS}					
Mehlich-3	0,894 **	0,879**					
Bray-I	0,883 **	0,938 **					
	Podzólico Vermelho-Amarelo muito argiloso	•					
resina	0,636 **	0,636 **					
Mehlich-1	0,414 **	0,400 **					
Mehlich-3	0,713 **	0,707 **					
Bray-I	0,841 **	0,847 ** ·					

^{**} significância ao nível de 1% de probabilidade

 $^{^{}m NS}$ não significância ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 20 - Correlação entre os teores de P-extraído pelos extratores e as respostas das plantas de arroz, em matéria seca e P-absorvido, considerando os solos utilizados.

	coeficiente de	coeficiente de correlação (r)		
Método	matéria seca	P-absorvido		
L	atossolo Amarelo-argiloso			
resina	0,632 **	0,688 **		
Mehlich-1	0,624 **	0,682 **		
Mehlich-3	0,795 **	0,911 **		
Bray-I	0,706 **	0,841 **		
Papel de filtro (Pi)	0,786 **	0,879 **		
Lato	ssolo Amarelo muito argilos	SO		
resina	0,692 **	0,729 **		
Mehlich-1	0,794 **	0,769 **		
Mehlich-3	0,765 **	0,874 **		
Bray-I	0,543 **	0,672 **		
Papel de filtro (Pi)	0,791 **	0,859 **		
	Latossolo Amarelo-médio			
resina	0,592 **	0,607 **		
Mehlich-1	0,656 **	0,702 **		
Mehlich-3	0,737 **	0,870 **		
Bray-I	0,620 **	0,792 **		
Papel de filtro (Pi)	0,750 **	0,839 **		
Podzól	ico Vermelho-Amarelo argii	loso		
resina	0,693 **	0,666 **		
Mehlich-1	0,481 **	0,430 **		
Mehlich-3	0,798 **	0,887 **		
Bray-I	0,723 **	0,884 **		
Papel de filtro (Pi)	0,564 **	0,534 **		
Podzólico	Vermelho-Amarelo muito a	argiloso		
resina	0,618 **	0,620 **		
Mehlich-1	0,631 **	0,658 **		
Mehlich-3	0,821 **	0,899 **		
Bray-I	0,707 **	0,814 **		
Papel de filtro (Pi)	0,599 **	0,636 **		

^{**} significância ao nível de 1% de probabilidade

Os coeficientes de correlação obtidos entre o P-extraído pelos extratores e a produção de matéria seca ou P-absorvido nas plantas de caupi (Tabela 19), demonstram claramente a sensibilidade dos extratores Mehlich-3 e Bray-I às variações de solos, pelas correlações significativamente elevadas, conseguidas por estes métodos. Alguns autores têm demonstrado a adequação do extrator Mehlich-3 em predizer o fósforo disponivel para as plantas, em solos com diferentes características. LINS & COX (1989), avaliando o efeito de algumas propriedades de sete solos de cerrado, com conteúdo de argila variando de 12% a 68%, sobre a predição das necessidades de fósforo para soja, verificaram que o extrator Mehlich-3 foi superior ao Bray-I e resina. PIHA (1993), comparando o extrator Mehlich-3 à resina, em solos de Zimbabwe, observou que as correlações de P-extraído pelos dois métodos com o crescimento da planta variou com a textura do solo. O autor assinalou, que em função do Mehlich-3 ter sido menos influenciado pela textura dos solos, foi considerado mais adequado para predizer o estado do fósforo sobre uma larga variação de tipos de solos. Resultados semelhantes foram também obtidos por GIROUX & TRAN (1985), que conseguiram boas correlações com o método, para diferentes tipos de solos.

A sensibilidade do extrator Bray-I às variações nas características de diferentes solos, já havia sido estabelecida por HOLFORD (1980a e 1980b), principalmente com respeito à capacidade tampão, que normalmente apresenta influência marcante na eficiência de extratores de fósforo do solo. De acordo com PRATT & GABBER (1964) e FREIRE et al. (1979), o extrator Bray-I apresenta-se sensível às variações dos teores de argila, sendo necessário, para utilização de seus níveis críticos, a separação dos solos por classe

de textura. O efeito normalmente citado para essa sensibilidade está relacionado à exaustão do extrator por reação com argila (PRATT & GARBER, 1964).

O extrator Mehlich-1 apresentou as mais baixas correlações com os parâmetros das plantas de caupi, em todos os solos utilizados. Estes resultados parecem estar relacionados à elevada capacidade de extração de fósforo, mesmo em situações onde as plantas possuem dificuldades em absorver o elemento. A ação do extrator processa-se tanto pelo deslocamento de fósforo adsorvido à superfície dos óxidos hidratados de ferro e alumínio (KAMPRATH & WATSON, 1980), quanto pela redução da readsorção do fósforo removido pelos ions hidrogênio (NELSON et al., 1953; THOMAS & PEASLEE, 1973). Em solos com altos teores de óxido de ferro e argila, os teores de fósforo obtidos por este método, normalmente são baixos, pela neutralização dos ácidos do extrator (THOMAS & PEASLEE, 1973). CAJUSTE & KUSSOW (1974) demonstraram que com o aumento do teor de argila em solos do Rio Grande do Sul, houve uma redução da eficiência do extrator Mehlich-1. As mais baixas correlações obtidas para o Mehlich-1 foram verificadas no PV-argiloso, enquanto que as melhores foram conseguidas no LA-argiloso, demonstrando que não somente variações no conteúdo da argila podem ter influenciado os resultados, mas também é provável que o tipo de argila esteja reduzindo a eficiência do método. NOVAIS & KAMPRATH (1979) chamam a atenção para um aspecto que deve ser levado em consideração, quando são utilizados solos de diferentes tipos. Os autores mencionam que o teor de argila utilizado em alguns trabalhos, para a interpretação do fósforo extraído por diferentes extratores, somente deve ser usado quando se tem solos com os mesmos tipos de argila.

Os coeficientes de correlação obtidos entre as quantidades de fósforo extraído pela resina e a produção de matéria seca ou fósforo absorvido pelo caupi (Tabela 19) apresentaram valores intermediários entre os extratores, situando-se logo abaixo do Mehlich-3 e Bray-I, sendo, entretanto, superior ao Mehlich-1, na maioria dos solos. Situação semelhante foi observada por KAMINSKI (1983), onde os coeficientes obtidos pela resina foram também satisfatórios, sendo inferiores aos obtidos pelo Bray-I e superiores aos obtidos pelo Mehlich-1. Contudo, RAIJ (1978), após ampla revisão, considerou o método de extração de fósforo com a resina, superior aos demais métodos pesquisados. Ainda segundo o autor, trata-se de um método versátil, adaptando-se bem às diferentes condições de solos.

Na Tabela 20 são apresentadas as correlações obtidas pelos diferentes métodos com os parâmetros das plantas de arroz, nos solos estudados. Observa-se que, para a maioria dos solos, houve aumento nos coeficientes de correlação da primeira para a segunda época de amostragem, mostrando que em estudos dessa natureza, os métodos de extração necessitam que seja estabelecido maior equilíbrio entre as formas de fósforo no solo, possibilitando, assim, maior eficiência dos diferentes métodos. Esses resultados parecem indicar que com o decorrer do tempo houve a transferência do fósforo dos adubos para o P-solução e desta forma, através de equilíbrio rápido, para as formas de P-lábil, concordando com as afirmações de RAIJ (1978). O autor menciona que a maioria dos métodos para avaliação da disponibilidade de fósforo do solo, baseiam-se em determinações que refletem o fator quantidade ou o fator intensidade. Apesar disso, os extratores Mehlich-1 e papel de filtro (Pi) não apresentaram boas correlações com as respostas das plantas, nos dois Podzólicos Vermelho-Amarelo.

4.3.2.3. Correlação geral entre as quantidades de P-extraído pelos extratores e as respostas biológicas das plantas.

Nas Figuras 15 a 22 encontram-se as representações gráficas das correlações gerais entre produção de matéria seca e P-absorvido pela parte aérea de caupi com as quantidades de fósforo extraídas pelos extratores com as respectivas equações de regressão e coeficientes de correlação.

Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as correlações entre a produção de matéria seca ou P-absorvido e os teores de P-extraído pelo método da resina. Percebe-se que houve uma dispersão bastante generalizada dos pontos, não havendo uma tendência muito nítida, ao longo da reta, que foi ajustada aos dados, demonstrando que o método não apresentou boa eficiência nas condições impostas no trabalho.

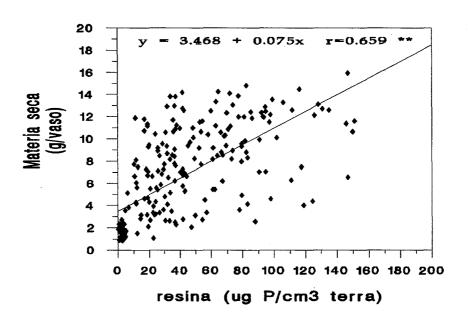


Figura 15 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina trocadora de íons e a produção de matéria seca de caupi.

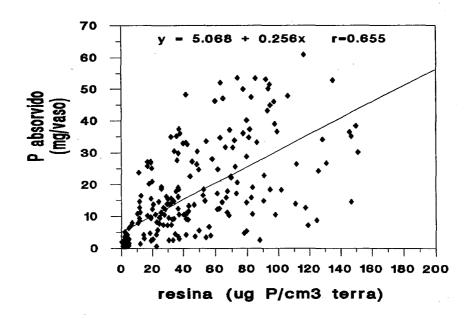


Figura 16 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina trocadora de íons e as quantidades de P-absorvido pelo caupi.

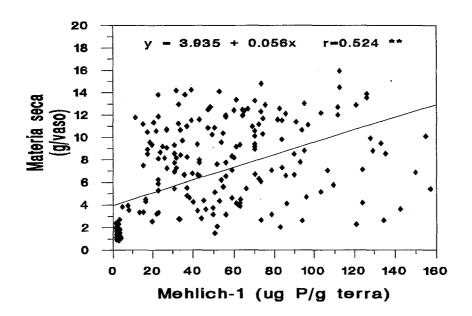


Figura 17 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e a produção de matéria seca de caupi.

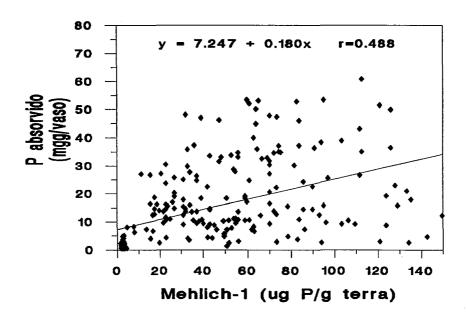


Figura 18 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de P-absorvido pelo caupi.

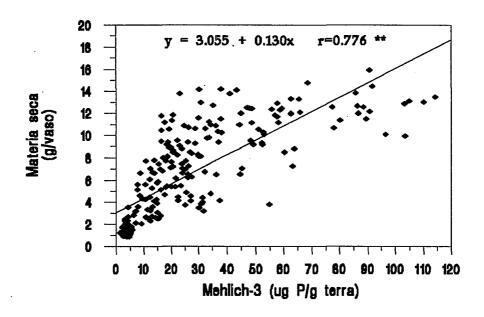


Figura 19 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e a produção de matéria seca de caupi.

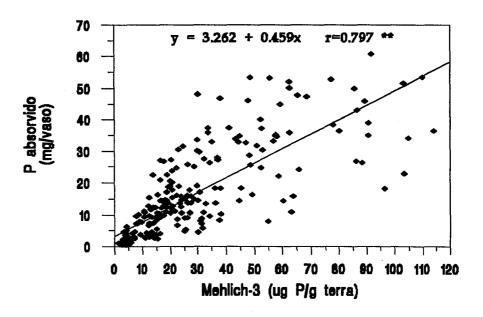


Figura 20 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e as quantidades de P-absorvido pelo caupi.

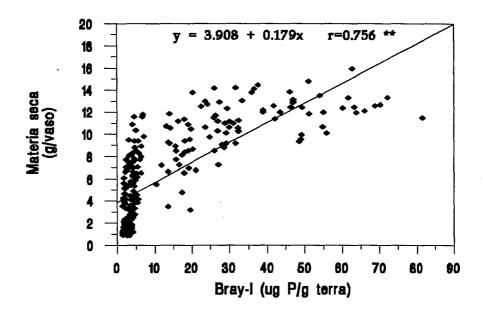


Figura 21 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e a produção de matéria seca de caupi.

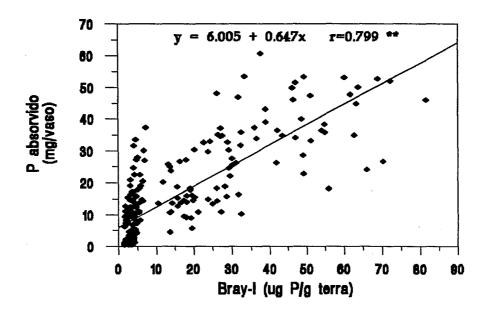


Figura 22 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e as quantidades de P-absorvido pelo caupi.

As mais baixas correlações foram observadas para o extrator Mehlich-1, que demonstrou um comportamento semelhante ao da resina, porém, apresentando, maior dispersão entre os dados (Figuras 17 a 18). Os extratores Mehlich-3 e Bray-I destacaram-se entre os métodos avaliados, por apresentarem as melhores correlações com as respostas das plantas de caupi. As Figuras 19 a 22 mostram claramente que o conjunto dos dados, para os dois extratores, apresentou uma relação mais estreita ao longo da reta, permitindo a visualização de uma tendência evidente, o que foi confirmado pelos elevados coeficientes de correlação. Entretanto, a distribuição gráfica dos pontos cruzados entre produção de matéria seca ou P-absorvido e P-extraído pelo extrator Bray-I (Figuras 21 e 22), apresentou um comportamento diferenciado dos demais métodos. Observouse que houve um agrupamento acentuado de pontos em uma faixa situada logo abaixo de 5 μg P/g solo, que provavelmente foi devido aos baixos teores de

fósforo extraído pelo método, nos solos que foram tratados com fosfato natural da Carolina do Norte, conforme já mencionado anteriormente.

A representação gráfica das correlações obtidas entre as quantidades de fósforo extraídas pelos diferentes métodos de extração e a produção de matéria seca ou P-absorvido pela parte aérea do arroz, com as respectivas equações de regressão e coeficientes de correlação, é apresentada nas Figuras 23 a 32. De modo geral, observou-se uma tendência para maior agrupamento dos pontos obtidos neste cultivo, principalmente para o método da resina e Mehlich-1, que apresentaram pontos bastante dispersos no primeiro cultivo. Para todos os extratores foram verificadas melhores correlações com as quantidades de fósforo absorvidas pelas plantas de arroz do que com a produção de matéria seca.

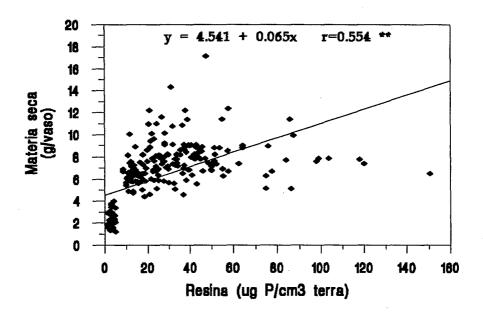


Figura 23 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina trocadora de íons e a produção de matéria seca de arroz.

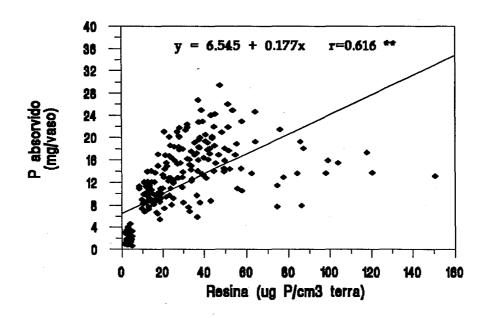


Figura 24 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método da resina trocadora de íons e as quantidades de P-absorvido pelo arroz.

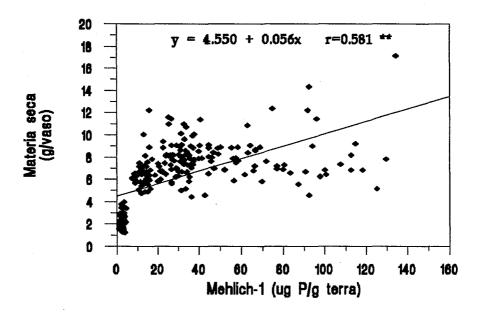


Figura 25 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e a produção de matéria seca de arroz.

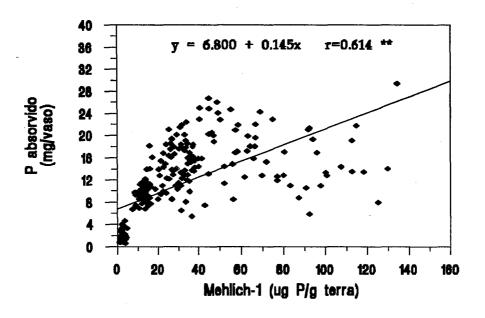


Figura 26 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de P-absorvido pelo arroz.

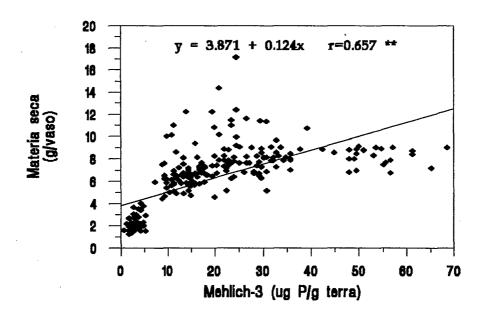


Figura 27 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e a produção de matéria seca de arroz.

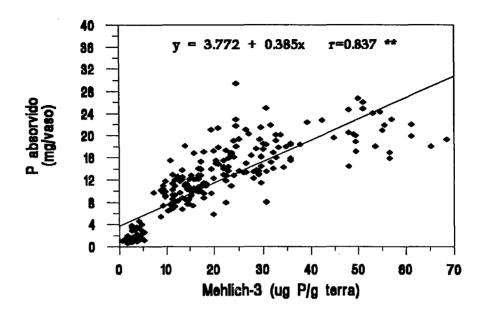


Figura 28 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Mehlich-3 e as quantidades de P-absorvido pelo arroz.

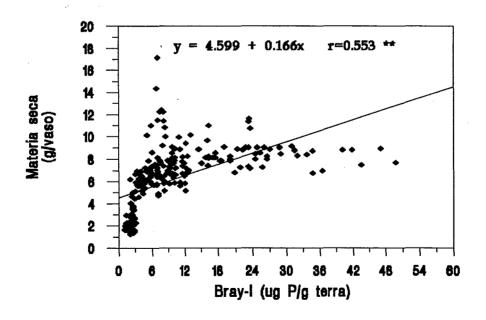


Figura 29 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e a produção de matéria seca de arroz.

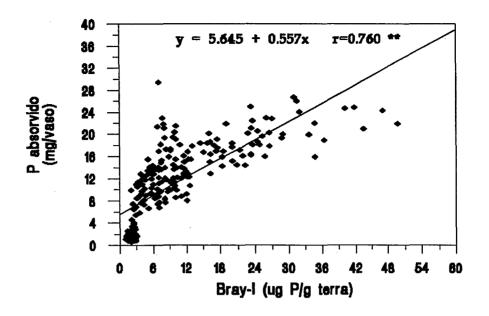


Figura 30 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo extrator Bray-I e as quantidades de P-absorvido pelo arroz.

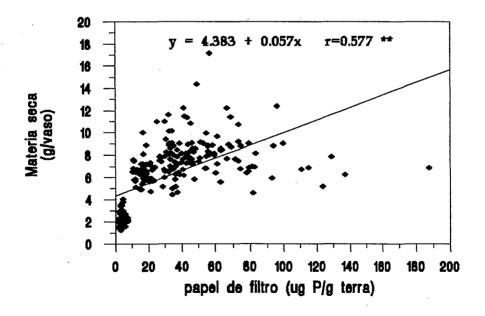


Figura 31 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método do Papel de filtro (Pi) e a produção de matéria seca de arroz.

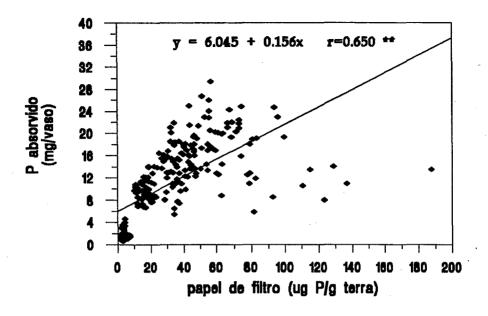


Figura 32 - Correlação entre os teores de P-extraído pelo método do Papel de filtro (Pi) e as quantidades de P-absorvido pelo arroz.

Os coeficientes de correlação obtidos pelos métodos da resina, Mehlich-1, Bray-I e papel de filtro (Pi) com a produção de matéria seca, foram bastante próximos, ficando em torno de 56%, enquanto que o coeficiente apresentado pelo Mehlich-3 foi ligeiramente superior. Para os teores de Pabsorvido, a melhor correlação foi verificada novamente para o extrator Mehlich-3, vindo logo abaixo o Bray-I, enquanto que para resina, Mehlich-1 e papel de filtro (Pi) foram observadas as mais baixas correlações.

Estes resultados demonstraram a superioridade do extrator Mehlich-3, sobre os demais, confirmando a eficiência do método mostrada nos itens anteriores, quando os dados foram agrupados de acordo com as fontes de fósforo ou com os tipos de solo. Este extrator, apesar de ter sido introduzido recentemente, tem chamado atenção de muitos pesquisadores, pelos bons resultados apresentados, visando a determinação dos teores de fósforo que se

encontram à disposição das plantas. TRAN et al. (1990) verificaram que o extrator foi mais confiável que o Bray-I e II, em solos ácidos com elevada capacidade de retenção de fósforo. EVANS & McGUIRE (1990) constataram que o extrator Mehlich-3, juntamente com o Mehlich-1, apresentou a melhor correlação, não somente para fósforo mas também para K, Ca e Mg. Resultados semelhantes foram obtidos por vários autores (GASCHO et al., 1990; LINS & COX, 1989; MICHAELSON & PING, 1986; BEEGLE & ORAVEC, 1990; TUCKER & HIGHT, 1990), onde o método tem demonstrado maior eficiência. Atualmente o extrator Mehlich-3 também tem sido considerado promissor para determinação de K, Ca, Mg, Na, B, Cu, Fe, Mn e Zn (ROHMAN & COX, 1988; SHUMAN et al., 1992; TUCKER & HIGHT, 1990; JONES, 1990), o que caracteriza uma vantagem a mais para o método.

O método do Papel de filtro impregnado com óxido de ferro, em virtude das correlações apresentadas, demonstra a necessidade de maiores ajustes metodológicos. Os resultados das correlações demonstraram ainda, que em geral o extrator Bray-I apresentou boas correlações com as respostas das plantas, apesar dos problemas observados com relação ao fosfato natural da Carolina do Norte.

Vislumbrando a possibilidade de predizer o comportamento de um extrator a partir de outro, os teores de fósforo "disponível" obtidos através dos métodos testados, foram correlacionados entre si, considerando as duas épocas de coleta das amostras de solo, conforme se observa na Tabela 21.

Nas amostras coletadas antes da semeadura do caupi, verificouse que os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-3 foram altamente correlacionados com os obtidos pelo Bray-I. O extrator Bray-I contém duas vezes mais fluoreto que o Mehlich-3, e por essa razão deveria extrair também mais fósforo ligado ao alumínio (TRAN et al., 1990). Contudo, a similaridade dos métodos tem sido relatada por WOLF & BAKER (1985), MEHLICH (1984) e GASCHO et al. (1990), dentre outros autores. MICHAELSON et al. (1987), avaliando os dois extratores em solos com cinzas vulcânicas, verificaram que o Mehlich-3 removeu mais fósforo que o Bray-I, apesar dos solos conterem quantidades significativas de alofana.

Tabela 21 - Correlação linear obtida entre as quantidades de fósforo extraído pelos diferentes extratores, em amostras coletadas antes da semeadura do caupi e do arroz.

	coeficiente de correlação (r)						
método	Mehlich-1	Mehlich-3	Bray-I	resina			
amostra coletadas antes da semeadura do caupi							
resina	0,496 **	0,623 **	0,458 **	-			
Mehlich-	-	0,521 **	0,308 **	-			
Mehlich-3	•	· -	0,850 **	-			
amostras coletadas antes da semeadura do arroz							
resina	0,529 **	0,614 **	0,441 **	-			
Mehlich -1	-	0,572 **	0,328 **	-			
Mehlich -3	-	- ,	0,887 **	-			
papel de filtro (Pi)	0,596 **	0,860 **	0,665 **	0,457 **			

^{**} significância ao nível de 1% de probabilidade

As correlações observadas entre o Mehlich-3 com o Mehlich-1 e resina, foram inferiores às obtidas com o Bray-I. Os resultados desta época de

amostragem, demonstram ainda, que os extratores Bray-I, Mehlich-1 e resina não apresentaram boas correlações entre si, o que pode ser reflexo das diferenças na capacidade extratora dos métodos, nas condições deste trabalho. De acordo com BAHIA FILHO et al. (1983) as correlações entre os teores de fósforo disponível por diferentes extratores, têm sido atribuída à extração preferencial de determinada forma de fósforo, associada a maior atividade da forma preferencialmente extraída. Contudo, estas explicações não parecem justificar satisfatoriamente as diferenças entre os extratores. Segundo BARBOSA FILHO et al. (1987), para o método da resina, a forma preferencialmente extraída foi P-Al, pressupondo-se, então que este extrator deveria correlacionar-se bem com o Bray-I, que também possui extração preferencial para a mesma forma (BAHIA FILHO & BRAGA, 1975), o que não ocorreu no presente experimento.

Por outro lado, HOLFORD (1980b) considera que, quanto mais similares forem dois extratores na sua sensibilidade ao tamponamento do solo, maior será a correlação entre ambos. Este aspecto parece explicar melhor os resultados obtidos, concordando também com os observados por BAHIA FILHO et al. (1983).

Os valores dos coeficientes de correlação verificados entre os extratores na segunda época de amostragem dos solos, demonstraram que os diferentes métodos apresentaram comportamentos semelhantes ao observado na primeira amostragem. Entretanto, vale mencionar a boa correlação apresentada pelos métodos Mehlich-3 e papel de filtro.

5 - CONCLUSÕES

Nas condições experimentais deste trabalho, os resultados permitem concluir que:

- O Latossolo Amarelo m.arg. e o Podzolico Vermelho-Amarelo arg. foram os solos com maior capacidade de retenção de fósforo.
- Os melhores rendimentos em produção de matéria seca e P-absorvido, no cultivo do caupi, foram obtidos nos solos tratados com superfosfato triplo.
- O maior tamanho das partículas do termofosfato yoorin-granular e fosfato natural da Carolina do Norte, influenciou negativamente as respostas das plantas de caupi, em produção de matéria seca e P-absorvido.
- No cultivo do caupi o termofosfato yoorin-fino apresentou IEA superior ao yoorin-granular e FNCN, enquanto, que no cultivo do arroz, os índices obtidos pelos fosfatos foram bastante semelhantes.
- Em todos os solos e época de amostragem, o extrator Mehlich-1 apresentou a maior capacidade de extração de fósforo, nos tratamentos com fosfato natural da Carolina do Norte.
- O método do papel de filtro impregnado com óxido de ferro apresentou comportamento similar ao Mehlich-1, com relação aos teores de fósforo no solo.
- Independentemente da fonte de fósforo utilizada, o extrator Mehlich-3 apresentou as melhores correlações com respostas das plantas de caupi e arroz.

- Os extratores Mehlich-3 e Bray-I demonstraram possuir maior sensibilidade às variações de solo.
- O extrator Mehlich-3 destacou-se dos demais, mostrando-se mais adequado em predizer a disponibilidade de fósforo para as plantas, em diferentes condições de solos e fontes de fósforo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, J.C. & PONCHIO, C.O. Caracterização das solubilidades das rochas fosfatadas brasileiras e termofosfatos em diferentes extratores químicos.

 Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 4:196-200, 1980.
- ALVAREZ V.V.H. Efecto de los factores cantidad intensidade y capacidad amortiguadora de fosfato em la evaluación del fósforo disponible de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Mesita Tarasca, Edi. Michoacán. Chapingo, 1982. 300p. (D.S Colégio de Postgraduados).
- AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of Soil phosphorus by anion exchange resin adsortion and ³²P equilibration. **Plant and Soil**, Hague, 6:391-408, 1955.
- ANDERSON, G. Factors affecting the estimation of phosphate esters in soil.

 Journal of the Science of Food and Agriculture, Essex, 11:497-503, 1960.
- ANGUINONI, I. Relação do fósforo com as características dos solos do Rio Grande do Sul e avaliação de sua disponibilidade por métodos químicos. Porto Alegre, 1972. 108p. (Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

- BACHE, B.W. Aluminium and iron phosphate studies relating to soils. II. Reactions between phosphate and hidrous oxides. **Journal of Soil Science**, Baltimore, **15**:110-6, 1964.
- BACHE, B.W. & IRELAND, C. Desortion of phosphate from soils using anion exchange resins. Journal of Soil Science, Baltimore, 31:297-306, 1980.
- BAHIA FILHO, A.F.C & BRAGA, J.M. Fósforo em Lotossolo do Estado de Minas gerais: II. Quantidade de fósforo "disponível". Revista Ceres, Viçosa, 22(119):50-61, 1975.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 7:243-9, 1983.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; VASCONCELOS, C.A.; SANTOS, H.L.; MENDES, J.F.; PITTA, G.V.E.; OLIVEIRA, A.C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo "disponível" em um latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 6:99-104, 1982.
- BALERDI, F.; MÜLLER, L.; FASSBENDER, F.W. Estudio del fosforo en suelos da America Central. III. Comparacion de cinco metodos quimicos de analisis de fosforo disponible. **Turrialba**, San José, **18**:348-60, 1968.

- BALDEON, J.R.M. Efeito das épocas de calagem na disponibilidade de fósforo aplicado 180 dias antes do plantio do arroz, em latossolos sob cerrado. Piracicaba, 1986. 93p. (Mestrado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- BARBOSA FILHO, M.P. Transformações de fósforo em solos ácidos de sequeiro (*Oriza sativa*, L.). Piracicaba, 1986. 104 p. (Doutorado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- BARBOSA FILHO, M.P.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 11:147-55, 1987.
- BARNES, J.S. & KAMPRATH, E.J. Availability of North Carolina rock phosphate applied to soils. North Caroline, Agri. Exp. Station, 1975. 22p. (Technique Bulletin, 229).
- BARROW, G.M. Physical chemistry. New York, Mcgraw-Hill, 1961. 694p.
- BARROW, N.J. The description of phosphate adsorption curves. **Journal of Soil Science**, Baltimore, **29**:447-62, 1978.

- BECKET, P.H.T. & WHITE, E.E. Studies on the phosphorus potentials of soils.

 Part. II: The pool of labile inorganic phosphate. Plant and Soil, Hague,
 21:253-82, 1964.
- BEEGLE, D.B. & ORAVEC, T.C. Comparison of field calibrations for Mehlich-P and K with Bray-kurtez P1 and ammonium acetate K for corn.

 Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21 (13-16):1025-36, 1990.
- BINGHAM, F.T. Chemical soil tests for available phosphorus. Soil Science, Baltimore, 94:87-95, 1962.
- BITTENCOURT, V.C. & ZAMBELLO, E.J. Comportamento do fósforo em solos tropicais I. Isotermas de adsorção. Piracicaba, CENA, 1975a. 23p. (Boletim, 12).
- BITTENCOURT, V.C. & ZAMBELLO, E.J. Comportamento do fósforo em solos tropicais. II Reações de retenção. Piracicaba, CENA, 1975b. 24p. (Boletim, 33).
- BIXBY, D.W. Sulfur requirements of the phosphate industry. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA, 1980. cap.5, p. 129-50.

- BLANCO, H.G.; VENTURINI, W.R.; GARGANTINI, H. Comportamento de fertilizantes fosfatados em diferentes condições de acidez de solo, para o trigo, em estudo do efeito residual para a soja. **Bragantia**, Campinas, **24**(22): 261-90, 1965.
- BOHN, H.; McNEAL, B.; O'CONNOR, G. Soil chemistry. 2.ed. Toronto, John Willey. 1985. 341p.
- BORKET, C.M.; CORDEIRO, D.S.; SFREDO, G.J.; PALHANO, J.B.; DITRICH, R.C. Efeito de doses de fósforo de diferentes fosfatos naturais na produção de soja, em condições de primeiro cultivo. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., Londrina, Anais. 1978. p.291-7.
- BRAGA, J.M. Adsorção aniônica dos solos. In: ______. Princípios básicos de química dos solo. Viçosa, UFV, 1979. p.78-144.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I. Trabalho de labotratório. **Revista Ceres**. Viçosa, **19**(102):124-36, 1972.
- BRAGA, N.R.; MASCARENHAS, H.A.A.; FEITOSA, C.T.; RAIJ, B. van. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 4:36-9, 1980.

- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes; métodos oficiais. Rio de Janeiro, 1988. 104p.
- BRAY, R.H. Correlation of soil tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirements. In: KITCHEN, H.B. **Diagnostic techniques for soils and crops**. Washington, American Potash Institute, 1947. p.53-85.
- BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. **Soil Science**, Baltimore, **59**(1):39-45, 1945.
- BUONDONNO, A.; COPPOLA, E; FELLECA, D; VIOLANTE, P. Comparing tests for soil fertility: I. Conversion equations between Olsen and Mehlich-3 as phosphorus extractants for 120 soils of south Italy. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 23: 699-716, 1992.
- CABALA, R.P. A disponibilidade de fósforo e o uso de extratores químicos no Brasil. Ilhéus, CPLAC, 1972. 27p.
- CABALA, R.P & SANTANA, M.B.M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 7(2):109-18, 1983.
- CABALA, R.P. & WILD, A. Direct use of low grade phosphate rock Brasil as fertilizer. Effect of reaction time in Soil. **Plant and Soil**, The Hague, **65**(2):351-62, 1982.

- CAJUSTE, L.J. & KUSSOW, W.R. Use and limitation on the North Caroline Method to predict available phosphorus in some oxisols. **Tropical Agriculture**, Trinidad, 51:248-52, 1974.
- CAMARGO, O.A. de; MUNIZ, A.C.; JORGE, T.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronônico de Campinas. Campinas, IAC, 1986. 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- CATANI, R.A. & BATAGLIA, O.C. Formas de ocorrência de fósforo no solo Latossolo roxo. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 25(1):99-119, 1968.
- CHANG, S.C. & JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. Soil Science. Baltimore, 84:133-44, 1957.
- CHIEN, S.H. Dissolution of phosphate rocks in a flooded acid soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41:565-657, 1977.
- CHIEN, S.H. Interpretation of Bray-1 extratable phosphorus from acid soil treated with phosphate rocks. Soil Science, Baltimore, 126 (1):34-9, 1978.
- CHIEN, S.H. & BLACK, C.A. Free energy of formation for carbonate apatites in some phosphate rocks. Soil Science Society of America Journal, Madison, 40:234-9, 1976.

- CHIEN, S.H. & HAMMOND, L.L. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potencial of phosphate rocks for direct application. Soil Science Society of America Journal, Madison, 42:935-9, 1978.
- CHIEN, S.H.; SALE, P.W.G.; FRIESEN, D.K. A discussion of methods for comparing the relative effective-ness of phosphate fertilizers varying in solubility. Fertilizer Research, Dordrecht, 24:149-57, 1990.
- COLEMAN, N.T.; THORUP, J.T.; JACKSON, W.A. Phosphate sorption reations that involve exchangeable Al. Soil Science, Baltimore, 90:1-7, 1960.
- COOKE, I.& HISLOP, J. Use of anion exchange-resin for the assessment of available soil phosphate. Soil Science, Baltimore, 96: 308-11, 1963.
- COREY, R.B. Physical-chemical aspects of nutrient availability. In: Soil testing and plant analysis. Madison, ASA., 1990. p.11-24.
- COSGROVE, D.J. Metabolism of organic phosphate in soil. In: McLAREN, A.D. & PETERSON, G.H. Soil biochemistry. New York, Marcel Dekker, 1967. p.216-8.
- DALAL, R.C. & HALLSWORTH, E.G. Measurement of exchangeable soil phosphorus and interrelationship among parameters of quantify, intensity

- and capacity factors. Soil Science Society of America Journal, Madison, 41:81-6, 1977.
- DEAN, L.A. & FRIED, M. Soil-plant relationships in the phosphorus nutrition of plants. In: PIERRE, W.H. & NORMAN, A.G. Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition. New York, Academic Press, 1953. p.43-58.
- DIEST, A. van; JESPERSEN, H.V.; WHITE, R.F.; BLACK, C.A. Test of two methods for measuring a labile fraction of inorganic phosphorus in soils.

 Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 24:498-502, 1960.
- DOLL, E.C.; MILLER, H.F.; FREEMAN, J.F. Initial and residual effects of rock phosphate and super phosphate. **Agronomy Journal**, Madison, **52**:246-50, 1960.
- DYNIA, J.F. Efeito do pH e da capacidade de retenção de fósforo dos solos na eficiência de adubos fosfatados. Porto Alegre, 1977. 61p. (Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 1979. n.p.

- ENGLESTAD, O.P; JUGSUJINDA, A.; De DATTA, S.K. Response by flooded rice to phosphate rocks varying in citrate solubility. Soil Science Society of America Journal, Madison, 38:524-9, 1974.
- EVANS, C.E. & McGUIRE, J.A. Comparison of soil test extractants on Alabama soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21(13-16):1037-50, 1990.
- FASSBENDER, H.W. Fósforo. In: ______. Química de suelos; com enfases em suelos da América Latina. Turrialba, Instituto Internacional de Ciências Agrícolas, 1978. p.262-307.
- FASSBENDER, H.W. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluacción usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana, Caracas, 3:203-14, 1966.
- FASSBENDER, H.W. Retención y transformación de fosfatos en 8 Latosoles de la Amazonia del Brasil. **Fitotecnia Latinoamericana**, Caracas, **6**(1):1-9, 1969.
- FEITOSA, C.T. & RAIJ, B. van. Influência da natureza de fosfatos aplicados à dois solos no fosfato solúvel em extratores químicos e disponível para trigo e milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, Campinas, Anais. 1975. p.215-220.

- FEITOSA, C.T.; RAIJ, B. van; DECHEN, A.R.; ALCARDE, J.C. Determinação preliminar da eficiência relativa de fosfatos, para trigo, em casa de vegetação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 2:193-5, 1978.
- FERREIRA, T.N. & KAMINSKI, J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais de Patos de Minas e Gafsa, puros e modficados por acidulação e calcinação.

 Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3:158-62, 1979.
- FITTS, J.W. & NELSON, W.L. The determination of lime and fertilizer requirements of soils through chemical tests. **Advances in Agronomy**, New York, 8:241-82, 1956.
- 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 da soja (Glycine max (L) Merril) baseada no fósforo disponível e no fator "capacidade". Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3:105-11, 1979.
- GASCHO,G.J.; GAINES, T.P.; PLANK, C.O. Comparison of extractants for testing coastal Plain soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21(13-16):1051-77, 1990.
- GIROUX, M. & TRAN, T.S. Evaluation du phosphore assimilable des soils acides avec differentes méthodes d'extraction en relation avec le rendement

- de l'avoine et les proprietes du sol. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 65:47-60, 1985.
- GOEDERT, W. J. Avaliação do efeito residual de fosfatos naturais em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **18**(5):499-506, 1983.
- GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Eficiência agronômica de fosfatos em solos do cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 15:311-8, 1980.
- GOEDERT, W.J. & LOBATO, E. Avaliação agronômica de fosfatos em solo de cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 8:97-102, 1984.
- GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. de. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. Anais. Brasília, EMBRAPA, 1984. p. 225-90.
- GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. de. Avaliação preliminar de fosfatos com acidulação parcial. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10:75-80, 1986.
- GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. de. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados não tradicionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE

- ROCHA FOSFÁTICA, 3., Brasília, 1986. Anais. São Paulo, IBRAFOS, 1986a. p.415-29.
- GOEDERT, W.J.; REIN, T.A.; SOUSA, D.M.G. de. Eficiência agronômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **25**(4):521-30, 1990.
- GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J. Solos de cerrado: tecnologias e estratégias de manejo. São Paulo, Nobel, 1987. p.129-66.
- GOEDERT, J.W.; SOUSA, D.M.G de; REIN, T.A. Princípios metodológicos para avaliação agronômica de fontes de fósforo. Planaltina, EMBRAPA/CPAC, 1986b. 23p. (EMBRAPA/CPAC.Documentos, 27).
- GONÇALVES, J.L.M. Cinética de transformação de fósforo lábil em não lábil em amostras de solos do cerrado. Viçosa, 1988. 62p. (Mestrado Universidade Federal de Viçosa).
- GUARDINI, R. Termofosfato magnesiano fundido: novos desenvolvimentos na tecnologia de produção. **Fertilizantes**, São Paulo, **9**(1):9-13, 1987.

- GUARDINI, R; RODRIGUES, J.C.; CASTILHOS, B. Produção de termofosfatos; estudo de economicidade. Fertilizantes, São Paulo, 5(3):5-9, 1983
- GUNARY, D. & SUTTON, G.D. Soils factors affecting plant uptake of phosphate. Journal of Soil Science, Baltimore, 18:167-73, 1967.
- HAMMOND, L. L; CHIEN, S.H.; MOKNUNYE. Agronomic value of unacidulation and pantially acidulated phosphate rochs indigenous to the tropics. Advances in Agronomy, New York, 40:89-140, 1986.
- HAMMOND, L. L. & LEON, L.A. Evaluacion del fosfato natural da Carolina del North como un fertilizante fosfatado. Suelos equatoriales, Medellin, 22(1): 143-9, 1992.
- HAMMOND, L. L.; LEON, L.A.; RESTREPO, L.G. Efecto residual de las aplicaciones de 7 fuentes de fósforo sobre el rendimiento de Brachiaria delumbens en un Oxisol de Carimagua. Suelos Ecuatoriales, Medellin, 12(2):122-8,1982.
- HASEMAN, J.F.; BROWN, E.H.; WHITT, C.D. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminium. Soil Science, Baltimore, 70:257-71, 1950.

- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determing asorption envelopes.

 Journal of soil Science, Baltimore, 23:177-92, 1972.
- HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil test in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 44:555-9, 1980a.
- HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationships betwen soil tests and labile phosphate in wheat-growing soils.

 Australian Journal of Soil Research, East Melbourne, 18:405-14, 1980b.
- HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. Plant and Soil, Hague, 44:377-89, 1976.
- HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Effects of phosphate buffering on the extraction of labile phosphate by plants and soil tests. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, 17:511-4, 1979.
- HSU, P.H. & RENNIE, D.A. Reactions of phosphate in aluminium systems. I. Adsorption of phosphate by x-ray amorphus aluminium hydroxide. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 42:197-209, 1962.

- HUSSAIN, A. & KYUMA, K. Change characteristics of soil organo mineral complexes and their effect on phosphate fixation. Soil Science and Plant Nutrition, Tokyo, 16:154-62, 1970.
- JONES, J.B. Universal soil extractants: their composition and use.

 Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York,
 21:1091-101, 1990.
- JUO, A.S.K. & KANG, B.T. Availability and transformation of rock phosphate in three forest soils from sorthern Nigeria. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 9: 493-505, 1978.
- KAMINSKI, J. Efeito de cinco fosfatos pré-, co- e pós aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench-CV. Conti-Brasil), em três solos ácidos. Piracicaba, 1983. 126p. (Doutorado Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- KAMPRATH, E.J.& WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLES, E.C.; KAMPRATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p.433-69.
- 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, Dordrecht, 15: 137-45, 1988.

- KHASAWNEH, F.E. & DOLL, E.C. The use of phosphate rocks for direct application to soils. Advances in Agronomy, New York, 30:159-206,1978.
- KITTRICK, J.A. & JACKSON, M.L. Electron microscop observations of the reactions of phosphate with mineral, leading to a unified theory of phosphorus fixation in soils. **Journal of Soil Science**, Baltimore, 7:81-8, 1956.
- KORNDORFER, G.H. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais fornecerem fósforo para plantas de trigo. Porto Alegre, 1978. 61p. (Mestrado-Universidade Federal do Rio Grande do Sul).
- KUO, S. & LOTSE, E.G. Kinetics of phosphate adsorption by calcium carbonate and Ca-kaolinite. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 36: 725-9, 1972.
- LANA, R.M.Q.; BRAGA, J.M.; RIBEIRO, A.C.; THIEBAUT, 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. **Revista Ceres**, Viçosa, **32**(179): 31-42, 1985.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. Advances in Agronomy, New York, 19:151-210, 1967.
- LARSEN, S. The use of P³² in studies on the uptake of phosphorus by plant.

 Plant and Soil, The Hague, 4(1):1-10, 1952.

- LATHWELL, D.L.; SANCHES, N.; LISK, D.J.; PEECH, M. Availability of soil phosphorus as determined by several chemical methods. Agronomy Journal, New York, 50:366-69, 1958.
- LEON, L.A.; FENSTER, W.E.; HAMMOND, L.L. Agronomic potencial of eleven phosphate rocks from Brazil, colombia, Perú and Venezuela. Soil Science Society of America Journal, Madison, 50:798-802, 1986.
- LEON, L.A. & HAMMOND, L.L. Efectividad agronômica de las rocas fosforicas del trópico Latino americano. In: La roca fosforica, fertilizante directo de bajo costo. Cochabamba, Bolívia, 1984. t.2, p.211-252.
- LIN, T.H.; HO, S.B.; HOUNG, K. The use of iron oxide-impregned filter paper for the extraction of available phosphorus from Taiwan soils. **Plant and Soil**, The Hague, **123**:219-26, 1991.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. Toronto, John Willey, 1979. 449p.
- LINDSAY, W.L. & STEPHENSON, H.F. Nature of the reactions of monocalcium phosphate in soils. IV. Repeated reactions with mestable triple-Point Solution. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 23:440-5, 1959.

- LINDSAY, W.L. & VLEK, L.G. Phosphate minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B. ed. Minerals in soil environments. Madison, SSSA., 1977. p.639-72.
- LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W.; STEPHESON, H.F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 26:446-52, 1962.
- LINS, I.D.G. & COX, F.R. Effect of extractant and selected soil properties on predicting the correct phosphorus fertilization of soybean. Soil Science Society of America Journal, Madison, 53:813-6, 1989.
- LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região Centro-Oeste. In: OLIVEIRA, A.; LOURENÇO; GOEDERT, W.J., ed. Adubação fosfatada no Brasil. Brasília, EMBRAPA/DID, 1982. p.201-39.
- LOW, P.F. & BLACK, C.A. Phosphate induced decomposition of kaolinite. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 12:180-4, 1948.
- LOW, P.F. & BLACK, C.A. Reactions of phosphate with kaolinite. Soil Science, Baltimore, 70:273-90, 1950.
- MACIEL, C.A.C. Estudos sobre a fixação de fósforo em alguns solos do Paraguay. Piracicaba, 1974. 79p. (Mestrado Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

- MALAVOLTA, E.& ROMER, J.P. Manual de adubação. 2. ed. São Paulo, ANDA, 1975. p.95-100.
- McLEAN, E.O. & LOGAN, T.S. Sources of phosphorus for plants grow in soils with differing phosphorus fixation tendencies. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 34:907-11, 1970.
- MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: A modification of Mehlich-2 extractant. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 15:1409-16, 1984.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. Communications in Soil Science and Plant Analisys, New York, 9:477-92, 1978.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Comparasion of Bray I and Pi Tests for evaluating plant available partially acidulated phosphate rocks.

 Plant and Soil, Hague, 114 (2): 211-6 1989a.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. The Pi soil phosphorus test; a new approach to testing for soil phosphorus. Internacional Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama. 1989b. 10p.

- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Development and evaluation of the Pi soil test for plant-available phosphorus. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21(13-16):1131-50, 1990a.
- MENON, R.G.; HAMMOND L.L.; SISSINGH, H.A. Determination of plant-available phosphorus by the iron hidroxide-impregnated filter paper (Pi) soil test. Soil Science Society of America journal, Madison, 52(1):110-5, 1988.
- MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L.; ARORA, B.R. Sorption of phosphorus by the iron oxide-impregnated filter paper (Pi soil test) embedded in soils. Plant and Soil, The Hague, 126:287-94, 1990b.
- MICHAELSON, G.J. & PING, C.L. Extraction of phosphorus from the major agricultural soils of alaska. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 17:275-97, 1986.
- MICHAELSON, G.J.; PING, C.L.; MITCHELL, G.A. Correlation of Mehlich-3, Bray-I and onium acetate extractable P,K, Ca and Mg for agricultural soils.

 Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 18:1003-15, 1987.
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzeas. Viçosa, 1990. 76p. (Mestrado -Universidade Federal de Viçosa)

- MULJADI, D.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. The mecanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboemite. Part I. The isotherm and the effect of pH on adsorption. **Journal of Soil Science**, Baltimore, 17:212-29, 1966a.
- MULJADI, D.; POSNER, AM.; QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. II. the location of adsorption sites. **Journal of Soil Science**, Baltimore, 17:230-7, 1966b.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate natural in waters. Analytica Chimica Acta, New York, 27:31-6, 1962.
- MUZILLI, O.; RÍSPOLI, J.C.S.; COSTA, N.A. Efeito da adubação fosfatada em solos ácidos do Sul do Paraná (Nota preliminar). Curitiba, UFPR/Escola de Agronomia, 1971. 7p.
- NASCIMENTO, C.N.B. do & HOMMA, A.K.O. **Amazônia:** meio ambiente e tecnologia agrícola. Belém, EMBRAPA/CPATU, 1984. 282p. (EMBRAPA/CPATU. Documentos, 27).
- NELSON, W.L.; MEHLICH, A.; WINTERS, E. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. In: PIERRE, W.H. & NORMAN, A.G. Soil fertilizer phosphorus. New York, Academic Press, 1953. p.153-88. (Agronomy, 14).

- 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. Phosphorus suppling capacity of previously heavily fertilized soils. Raleigh, 1977. 153p. (PhD. North Carolina State University).
- NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do fator capacidade. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3:41-6, 1979.
- NOVOA, F.V. & NUNES, R. Efficiency of five phosphate fertilizer sources in soils with differents phosphate fixing capacities. **Tropical Agriculture**, Trinidad, **51**(2): 235-45, 1974.
- OLIVEIRA, H. F. Eficiência da resina trocadora de íons e de extratores químicos para fósforo, comparados através da resposta biológica do Painço. Piracicaba, 1986. 106p. (Mestrado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- OLIVEIRA, E.L. de; MUZILLI, O.; IGUE, K.; TORNERO, M.T.T. Avaliação da eficiência agronômica de fosfatos naturais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 8:63-7, 1984.

- OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. ed. The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA., 1980. p.361-410.
- OLSEN, S.R. & WATANABE, F. A method to determine a phosphorus absortion maximum of isoter. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 21(1):144-9, 1957.
- OLSEN, S.R.; COLO, C.Y; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by sodium bicarbonate. Washington, USDA., USGPO. 1954. (USDA circulation, 939).
- PALMA, G & FASSBENDER, H.W. Estudio del fósforo en suelos da America Central. V. Uso de resina de intercambio para evaluar la disponibilidad de P. Turrialba, San José, 20:279-87, 1970.
- PIHA, M.I. Evaluation of Mehlich-3 extractant for estimating phosphorus deficiency and phosphorus sorption of zimbabwean soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 24(11-12):1397-1408, 1993.
- PISSARIDES, A.; STEWART, J.W.B.; RENNIE, D.A. Influence of cation saturation on phosphorus adsorption by selected clay minerals. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 48:115-57, 1968.

- PRATT, F.P. & GARBER, M.J. Correlations fo phosphorus availability by chemical tests with inorganic phosphorus fractions. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 28:23-6, 1964.
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 2:1-9, 1978.
- RAIJ, B. van. Fósforo: dinâmica e disponibilidade no solo. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO, 1., Ilha Solteira, 1987. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p.161-79.
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo, Agronômica Ceres, Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343p.
- RAIJ, B. van & DIEST, B. van. Phosphate supplying power of rock phosphate in an oxisol. Plant and Soil, The Hague, 55(1): 97-104, 1980.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solos para fins de fertilidade. Campinas, IAC, 1983. 31p. (IAC. Boletim Técnico, 81).
- RAIJ, B. van; CABALA, R.P.; LOBATO, E. Adubação fosfatada no Brasil-Apreciação geral, conclusões e recomendações. In: OLIVEIRA, A.J.;

- LOURENGO, S; GOEDERT, W.J. Adubação fosfatada no Brasil. Brasília, EMBRAPA/DID, 1982. p.1-19.
- RAIJ, B. van.; CARMELO, Q.A.C.; GROHMAN, F. Influência do grau de moagem na eficiência de dois fosfatos naturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Anais. 1979. p.37.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; GROHMAN, F. Eficiência agronômica de fosfatos naturais brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 18., Salvador, 1981. Anais. Ilhéus, CEPLAC/CEPEC, 1981, p.46-67.
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Extractable phosphorus availability indexes as affected by liming. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21:1267-76, 1990.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; SILVA, N.M. da. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, **43**(1):17-29, 1984.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. da. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soil by an ion-exchange resin procedure. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 17:547-66, 1986.

- RAIJ, B. van; SILVA, N.M. da; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELINAZZI JUNIOR, R.; DECHEN, A.R.; TRANI, P.E. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, IAC, 1992. 107p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- RAJAN, S.S.S. & FOX, R.L. Phosphate adsorption by soils: II. Reactions in tropical acid soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39: 846-51, 1975.
- RAJAN, S.S.S. & PERROTT, K.W. Phosphate asorption by synthetic amorphus aluminosilicate. **Journal of Soil Science**, Baltimore, **26**:257-66, 1975.
- RAJAN, S.S.S.; PERROTT, K.W.; SAUNDERS, W.M.H. Identification of phosphate-reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate sorption at constant pH values. **Journal of Soil Science**, Baltimore, **25**:438-47, 1974.
- ROHMAN, P.C. & COX, F.R. Evaluation of the modified Olsen extracting reagent for copper, zinc and manganese. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 19:1859-70, 1988.
- RUSSEL, E.J. & PRESCOTT, J.A.. The reaction between dilute acids and the phosphorus compoud of the soil. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, 8:65-110, 1917.

- RUSSEL, E.W. Soil condictions and plant growth. 10. ed., London, Longman Group, 1973. 849 p.
- SÁ Jr., J.P.M.; GOMES, I.F.; VASCONCELOS, A.L. de. Retenção de fósforo em solos da Zona da Mata de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **3**:183-8, 1968.
- SALOMON, M. & SMITH, J.B. Residual soil phosphorus from various fertilizer phosphates extracted by different solvents. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 20:33-6, 1956.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertlizer in soils. In: KHASAWNEH, F.C.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. ed., The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA., 1980. cap.11, p. 263-310.
- SANCHES, P.A. Fósforo, silicio y azufre. In: Suelos del tropicos; características y manejo. San José, IICA, 1981. 234p.
- SARRUGE, J.R. & HAAG, H.P. Análises químicas em plantas. Piracicaba, ESALQ, 1974. 57p.
- SCHOFIELD, R.K. Can a precise meaning be given to "available" soil phosphorus. Soil and Fertilizers, Wallingford, 18:373-5, 1955.

- SHUMAN, L.M.; BANDEL, V.A.; DONOHUE, S.J.; ISAAC, R.A.; LIPPERT, R.M.; SIMS, J.T.; TUCKER, M.R. Comparison of Mehlich-1 and Mehlich-3 extractable soil boron with hot-water extractable boron. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 23:1-14, 1992.
- SILVA, F.C. da. Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em solos cultivados com cana-de-açúcar. Piracicaba, 1991, 165 p. (Mestrado Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SILVA, N.M.A. Efeito 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).
- SMITH, A.N. The uptake of phosphorus by wheat and clover from four inorganic soil phosphate fractions after the adition of constrasting types of phosphatic fertilizer. **Plant and Soil**, The Hague, **29**(1):144-55, 1968.
- SMITH, F.W.; ELLIS, B.G.; GRAVA, J. Use of acid-fluoride solution for the extraction of available phosphorus in calcareous soil and soils which rock phosphate has been added. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 21:400-4, 1957.
- SMITH, J.P. & LEHR, J.R. An X-ray investigation of carbonate apatites. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, Washington, **14**:342-9, 1966.

- SOUSA, D.M.G. de & VOLKWEISS, S.J. Reações do superfosfato triplo em grânulos com solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 11:133-40, 1987a.
- SOUSA, D.M.G. de & VOLKWEISS, S.J. Rendimento da Matéria seca e conteúdo de fósforo da parte aérea do milho influenciados pela adubação com superfosfato triplo em pó e em grânulos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 11:127-32, 1987b.
- STEFANUTI, R. Efeito da granulometria de um termofosfato magnesiano no aproveitamento do fósforo. Piracicaba, 1991. 76p. (Mestrado Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP).
- STEPHEN, R.C. The Agronomic value of products resulting from the partial acidulation of North Caroline phosphate rock with phosphoric acid. Fertilizer Research, Dordrecht, 8:67-73, 1985.
- SUAREZ, D & IGUE, K. Effecto del tamaño de granos en la absorcion de fósforo em suelos volcánicos. **Turrialba**, San José, **24**: 180-6, 1974.
- SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SMILLIE, G.W.; CORREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by langmuir adsortion equation. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37:358-63. 1973

- TANAKA, R.T. Efeito do método de aplicação e do período de incubação na eficiência Agronômica dos fosfatos. Piracicaba, 1990. 122p. (Doutorado-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- TAYLOR, A.W. & GURNEY, E.W. Precipitation of phosphate by iron oxide and aluminium hidroxide from solutions containing calcium and potassium.

 Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 29:18-22, 1965.
- THOMAS, G.W. & PEASLEE, D.E. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.W. & BEATON, J.D., ed. Soil testing and plant analysis. Madison, SSSA, 1973. p.15-29.
- TRAN, T. S.; GIROUX, M.; GUILBEAUT, J.; AUDESS, P. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec Soils.

 Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21:1-28, 1990.
- TUCCI, C.A.F. Disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia. Viçosa, 1991. 142p. (Doutorado Universidade Federal de Viçosa).
- TUCKER, M.R. & HIGHT, P.T.A. comparison of the results from three soil testing laboratories using the Mehlich-3 extractant on southeastern coastal plain soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 21(17-18):2197-208, 1990.

- VAN DER PAAUW, F. Factors controlling the efficiency of rock phosphates for potatoes and rye on humic sandy soils. **Plant and Soil**, The Hague, **22**:81-98, 1965.
- VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H.L. de; FRANÇA, G.E. de; PITTA, G.V.E; BAHIA FILHO, A.F.C. Eficiência agronômica de fosfatos naturais para a cultura do sorgo granífero. I- fósforo total e solúvel em ácido cítrico e granulometria. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10:117-26, 1986.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico,7).
- VOLK, V.V. & MAcLEAN, E.O. The fate of apllied phosphorus in four ohio soils. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, 27(1):53-8, 1963.
- VOLKWEISS, S.J. & RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4., Brasília, 1976. São Paulo, Itatiaia, 1977. p.317-32. (Coleção Reconquista do Brasil, 38).
- WILD, A. The retention of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, Baltimore, 1:221-38, 1950.

- WILD, A. Soluble phosphate in soil and uptake by plants. Nature, New York, 203:326-7, 1964.
- WILLIAMS, E.G. Effects of acid treatment of soils on phosphate availability and solubility. **Journal of Soil Science**, Baltimore, **2**:110-7, 1951.
- WOLF, A.M. & BAKER, D.E. Comparison of soil test phosphorus by Olsen, Bray P1, Mehlich-I and Mehlich-III methods. Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, 16:467-84, 1985.
- YOST, R.S.; NADERMAN, G.C.; KAMPRATH, E.J.; LOBATO, E. Availability of rok phosphate as measured by an acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, **74**:462-8, 1982.
- ZEE, S.E. A.T.M. van der; FOOKKINK, L.G.J.; RIEMSDIJK, W.H. A new technique for assement of reversibly adsorbed phosphate. Soil Science Society of America Journal, Madison, 51:599-604, 1987.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Dados originais do ensaio de adsorção de fósforo, nos diferentes solos estudados.

	P	concentração	P	mg P adsorv.	P-equilíbrio
Tipo de	aplicado	em equilíbrio	adsorvido		
solo	(µg P/ml)	(µg P/ml)	(µg P/ml)	g de solo	mg P/g solo
LA arg.	20	6,03	13,97	0,14	43,06
	40	19,22	20,78	0,21	91,52
	60	36,00	24,00	0,24	150,00
	80	54,21	25,79	0,26	208,50
	100	71,04	28,96	0,29	244,96
LA m.arg.	20	1,07	18,93	0,19	5,62
	40	6,87	33,13	0,33	20,74
	60	15,88	44,12	0,44	36,00
	80	27,10	52,91	0,53	51,22
	100	42,39	57,61	0,58	73,08
LA m.	20	6,51	13,49	0,13	50,07
	40	21,55	18,45	0,18	119,72
	60	38,45	21,55	0,22	174,77
	80	57,31	22,69	0,23	249,17
•	100	77,91	22,09	0,22	354,14
PV arg.	20	4,72	15,28	0,15	31,47
	40	16,95	23,05	0,23	73,54
	60	32,12	27,88	0,28	114,71
	80	49,73	30,27	0,30	165,77
	100	70,14	29,86	0,30	233,80
PV m.arg.	20	6,57	13,43	0,13	50,53
	40	20,71	19,29	0,19	109,00
	60	37,73	22,27	0,22	171,50
	80	56,77	23,23	0,23	246,82
	100	76,41	23,59	0,24	318,37

APÊNDICE 2

Resumo da análise de variância dos parâmetros produção de matéria seca e

quantidade de fósforo absorvido pelas plantas de caupi.

Causas de		Va	lor F
variação	g.l.	Matéria seca	P-absorvido
Solo (S)	4	80,71 **	118,90 **
Fonte de P (F)	3	350,25 **	335,01 **
Dose (D)	3	1063,48 **	923,51 **
SxF	12	11,63 **	15,42 **
SXD	12	10,51 **	15,11 **
F x D	9	44,39 **	66,97 **
SxFxD	36	4,66 **	5,79 **
Resíduo	158	-	<u> </u>
Média	· -	6,49	15,39
C.V.	-	13,42	19,36

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 3

Resumo da análise de variância dos parâmetros produção de matéria seca e P absorvido pelas plantas de arroz.

Causas de		Valor F		
variação	g.l.	Matéria seca	P-absorvido	
Solo (S)	4	76,11 **	52,03 **	
Fonte de P (F)	3	7,82 **	47,95 **	
Dose (D)	3	808,11 **	1283,55 **	
SxF	12	10,71 **	10,67 **	
SXD	12	10,97 **	7,89 **	
F x D	9	1,78 ^{NS}	12,22 **	
SxFxD	36	2,09 **	3,92 **	
Resíduo	158	_		
Média	-	6,26	11,22	
C.V.	-	12,19	13,69	

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

^{NS} Não significativo (Probabilidade > 5%)

APÊNDICE 4

Análise de regressão polinomial para produção de matéria seca da parte aérea de plantas de caupi em função de níveis de fósforo.

Solo	Fonte	Equação de regressão	r^2
LA arg.	SFT	$y = 1,79 + 0,22x - 0,001x^2$	0,986 **
	FNCN	y = 2,08 + 0,55x	0,971 **
	Yoorin-g	$y = 1,53 + 0,10x - 0,0003x^2$	0,974 *
	Yoorin-f	$y = 2.01 + 0.16x - 0.0006x^2$	0,986 **
LA m.arg.	SFT	$y = 1,26 + 0,17x - 0,0006x^2$	0,995 **
	FNCN	y = 1,11 + 0,05x	0,997 **
	Yoorin-g	y = 1,43 + 0,03x	0,964 **
	Yoorin-f	y = 1,15 + 0,08x	0,987 **
LA m.	SFT	$y = 2,32 + 0,25x - 0,001x^2$	0,972 **
	FNCN	$y = 2.01 + 0.10x - 0.0004x^2$	0,998 **
	Yoorin-g	$y = 2,30 + 0,17x - 0,0008x^2$	0,998 **
	Yoorin-f	$y = 2,50 + 0,22x - 0,001x^2$	0,967 **
PV arg.	SFT	$y = 1,36 + 0,21x - 0,001x^2$	0,975 **
_	FNCN	y = 1,37 + 0,01x	0,907 *
	Yoorin-g	y = 1,85 + 0,04x	0,999 **
	Yoorin-f	$y = 1,37 + 0,17x - 0,001x^2$	0,996 **
PV m.arg.	SFT	$y = 1,33 + 0,23x - 0,001x^2$	0,995 **
•	FNCN	$y = 1,16 + 0,10x - 0,0005x^2$	0,973、**
	Yoorin-g	$y = 1,27 + 0,02x - 0,0006x^2$	0,989 **
	Yoorin-f	y = 1,34 + 0,08x	0,945 **

^{*} Significância ao nível de 5% de probabilidade

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 5

Análise de regressão polinomial para produção de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função de níveis de fósforo.

Solo	Fonte	Equação de regressão	r ²
LA arg.	SFT	$y = 3,30 + 0,13x - 0,0007x^2$	0,983 **
	FNCN	$y = 3,40 + 0,10x - 0,0005x^2$	0,963 **
•	Yoorin-g	$y = 3,34 + 0,08x - 0,0003x^2$	0,974 *
	Yoorin-f	$y = 3,11 + 0,11x - 0,0006x^2$	0,995 **
LA. m.arg.	SFT	$y = 2,09 + 0,17x - 0,0009x^2$	0,979 **
_	FNCN	$y = 2,66 + 0,20x - 0,0009x^2$	0,986 **
	Yoorin-g	$y = 2,10 + 0,14x - 0,0006x^2$	0,997 **
	Yoorin-f	$y = 2,35 + 0,11x - 0,0004x^2$	0,999 **
LA m.	SFT	$y = 2,10 + 0,12x - 0,0006x^2$	0,993 **
	FNCN	$y = 2,25 + 0,10x - 0,0005x^2$	0,966 **
	Yoorin-g	$y = 1,97 + 0,11x - 0,0006x^2$	0,988 **
	Yoorin-f	$y = 2,05 + 0,13x - 0,0007x^2$	0,993 **
P.V. arg.	SFT	$y = 2,04 + 0,13x - 0,0006x^2$	0,998 **
*	FNCN	$y = 2.08 + 0.07x - 0.0003X^2$	0,977 *
	Yoorin-g	$y = 2.09 + 0.11x - 0.0006x^2$	0,998 **
	Yoorin-f	$y = 2,41 + 0,09x - 0,0004x^2$	0,999 **
P.V. m. arg.	SFT	$y = 1,69 + 0,13x - 0,0006x^2$	0,988 **
	FNCN	$y = 2.21 + 0.12x - 0.0007x^2$	0,940 **
	Yoorin-g	y = 2.12 + 0.06x	0,891 **
	Yoorin-f	$y = 1,99 + 0,13x - 0,0008x^2$	0,811 **

^{*} Significância ao nível de 5% de probabilidade

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 6

Resumo da análise de variância para os teores de fósforo extraído pelo método da resina, em amostras de solo coletadas no plantio do caupi e do arroz.

Causas de		Valor F	
variação	g.l.	plantio caupi	plantio arroz
Solo (S)	4	67,72 **	2,77 *
Fonte de P (F)	3	52,83 **	15,81 **
Dose (D)	3	299,20 **	242,12 **
SxF	12	14,04 **	2,27 *
SXD	12	18,85 **	6,02 **
FxD	9	12,19 **	11,26 **
SxFxD	36	4,24 **	2,94 **
Resíduo	158	-	-
Média	<u>-</u>	37,39	20,94
C.V.		37,06	38,28

^{*} Significância ao nível de 5% de probabilidade

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 7

Resumo da análise de variância para os teores de fósforo extraído pelo extrator

Mehlich-1, em amostras de solo coletadas no plantio do caupi e do arroz.

Causas de		Va	lor F
variação	g.1.	plantio caupi	plantio arroz
Solo (S)	4	15,67 **	6,68 **
Fonte de P (F)	3	90,18 **	245,26 **
Dose (D)	3	424,68 **	595,48 **
SxF	12	6,05 **	3,04 **
SXD	12	3,85 **	3,88 **
F x D	9	16,51 **	42,18 **
SxFxD	36	4,03 **	2,24 **
Resíduo	158		
Média	-	50,51	30,46
C.V.	_	31,51	26,09

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 8

Resumo da análise de variância para os teores de fósforo extraído pelo extrator

Mehlich-3, em amostras de solo coletadas no plantio do caupi e do arroz.

Causas de		Valor F	
variação	g.1.	plantio caupi	plantio arroz
Solo (S)	4	4,78 **	33,89 **
Fonte de P (F)	3	155,52 **	211,50 **
Dose (D)	3	420,16 **	1989,39 **
SxF	12	11,03 **	27,90 **
SXD	12	2,93 **	14,22 **
F x D	9	31,68 **	51,90 **
SxFxD	36	4,84 **	18,06 **
Resíduo	158	•	
Média		26,42	19,34
C.V.	· -	29,11	13,04

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 9

Resumo da análise de variância para os teores de fósforo extraído pelo extrator

Bray-I, em amostras de solo coletadas no plantio do caupi e do arroz.

Causas de		Valor F		
variação	g.1.	plantio caupi	plantio arroz	
Solo (S)	4	11,239 **	38,43 **	
Fonte de P (F)	3	406,47 **	772,82 **	
Dose (D)	3	331,36 **	1471,41 **	
SxF	12	11,82 **	35,77 **	
SXD	12	2,82 **	18,89 **	
FxD	9	78,87 **	184,24 **	
SxFxD	36	5,32 **	17,76 **	
Resíduo	158	-		
Média	-	14,51	10,01	
C.V.	-	32,13	14,59	

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE 10

Resumo da análise de variância para os teores de fósforo extraído pelo método do Papel de filtro (Pi), em amostras de solo coletadas no plantio do caupi e do arroz.

Causas de		Valor F		
variação	g.l.	plantio caupi	plantio arroz	
Solo (S)	4	· -	15,28 **	
Fonte de P (F)	3	· •	111,04 **	
Dose (D)	3	-	757,82 **	
SxF	12	-	14,71 **	
SXD	12	-	6,42 **	
F x D	9	·	19,93 **	
SxFxD	36	_	9,61 **	
Resíduo	158		-	
Média	••	-	33,08	
C.V.	-	-	22,42	

^{**} Significância ao nível de 1% de probabilidade