



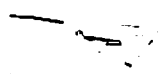
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA
E DA CALAGEM, NÍVEIS CRÍTICOS E
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA O
ARROZ EM SOLOS INUNDADOS**

ISABELA ORLANDO DOS SANTOS MARIANO

1999

THE UNIVERSITY OF CHICAGO



48077

33f34m2.

ISABELA ORLANDO DOS SANTOS MARIANO

**EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DA CALAGEM,
NÍVEIS CRÍTICOS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA O
ARROZ EM SOLOS INUNDADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Lavras como parte das exigências do Curso
de Mestrado em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas,
para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. VALDEMAR FAQUIN

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1999**

CD-031.18875
031.18875

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Mariano, Isabela Orlando dos Santos

Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem, níveis críticos e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados / Isabela Orlando dos Santos Mariano. -- Lavras : UFLA, 1999.

74 p. : il.

Orientador: Valdemar Faquim.
Dissertação (Mestrado) – UFLA.
Bibliografia.

1. Arroz. 2. Adubação fosfatada. 3. Calagem. 4. Efeito residual. 5. Solo de várzea. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.18893
-631.422

ISABELA ORLANDO DOS SANTOS MARIANO

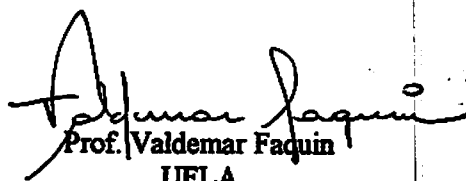
**EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DA CALAGEM,
NÍVEIS CRÍTICOS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA O
ARROZ EM SOLOS INUNDADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal
de Lavras como parte das exigências do Curso
de Mestrado em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas,
para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 5 de novembro de 1999

Prof. Luiz Roberto Guimarães Guilherme UFLA

Prof. Luiz Arnaldo Fernandes UFLA


Prof. Valdemar Faquin
UFLA

(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

INSTITUTO DE CIÊNCIAS E LETRAS

EXCETO RESIDUAL DA AMPLAÇÃO DE FORTALEÇA E DA CALAGEM
NÍVELS CRÍTICOS E MINIMIZAÇÃO DE RISCO PARA O
ANEXO EM SOLOS INUNDÁVEIS

4.1.1. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de utilização de solos inunda-

4.1.2. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de utilização de solos inunda-

4.1.3. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de utilização de solos inunda-

Para obtenção do título de "Mestre",
o trabalho em questão foi submetido à Universidade Federal
de Lavras como parte das exigências do Curso
de Mestrado em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas.

APROVADA em 2 de novembro de 1999

Prof. Dr. Roberto Guimarães Guilherme UFPA

Prof. Dr. Amândio Fernandes UFPA

Assinatura do(a) orientador(a)

Prof. Dr. Valdemar Pinheiro
UFPA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

Aos meus pais, Sandra e Reynaldo, pelo esforço dedicado à minha formação.

Aos meus irmãos, Fernando e Carolina, pela amizade e estímulo.

Ao meu marido, Eduardo, pelo amor, carinho, cumplicidade e paciência.

DEDICO

“Lembra que és tão bom como o que de melhor tiveres feito na vida.”

AGRADECIMENTOS

1972

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de pesquisa "Avaliação da qualidade da água em áreas urbanas e rurais", financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Estado de São Paulo (FAPESP).

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. [Nome], Prof. Dr. [Nome] e Prof. Dr. [Nome], pela orientação, incentivo e apoio durante todo o processo de desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, especialmente [Nome], [Nome] e [Nome], pela amizade, colaboração e suporte durante a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus familiares, especialmente aos meus pais, [Nome] e [Nome], pelo amor, apoio e incentivo constante.

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de [Nome], sob a orientação de [Nome].

Os dados foram coletados em [Nome] e [Nome], com o apoio de [Nome] e [Nome].

Agradeço ao [Nome] e ao [Nome] pela disponibilização dos dados e pela colaboração durante a análise dos resultados.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa "Avaliação da qualidade da água em áreas urbanas e rurais", financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Estado de São Paulo (FAPESP).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao CNPq, pela oportunidade de realização do curso e pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Valdemar Faquin, pela orientação, apoio e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Ao professor Antonio Eduardo Furtini Neto, pelos esclarecimentos e sugestões.

Ao Luiz Arnaldo Fernandes pela amizade, incentivo e orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Luiz Roberto Guimarães Guilherme, pelas sugestões apresentadas.

À Dra. Miralda Bueno de Paula e ao Janir da EPAMIG, pelas informações práticas.

Aos amigos Ana Rosa, Romilson, Watson, Marcelo, Júlio Bertoni, Larissa, Geraldo Jânio, Geraldo Durães, Fábio Corrêa, Amauri, Alex e Antônio, pela agradável convivência diária.

Aos irmãos Flávia, Isabel e Duda, pelo carinho, solidariedade e momentos de convivência.

A todo o corpo docente, discente e de funcionários do Departamento de Ciência do Solo, que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho.

ACORDÃO

Página

1. A Universidade Federal de Juazeiro (UFJZ) e no CNPq, pelo
reconhecimento da importância do curso e pela concessão de bolsa de estudos.
2. Ao professor Valdemar Lima, pela orientação, apoio e ensinamentos
concedidos durante o curso.
3. Ao professor Antonio Eduardo Figueira, pelos esclarecimentos e
orientações.
4. Ao professor Fernando de Sá, pela amizade, incentivo e orientação em
todas as etapas deste trabalho.
5. Ao professor João Roberto Guimarães, pelas sugestões
e orientações.
6. Ao professor José de Fátima e ao grupo de trabalho da EPAMIG, pelas
informações prestadas.
7. Aos pesquisadores Rosa Romilson, Wilson, Manoel, João Roberto,
Lúcia, Gêise, Gêise, Gêise, Fábio, Gêise, Gêise, Gêise e Gêise.
8. Ao grupo de convivência.
9. Aos professores Fábio, Fábio e Duda, pelo carinho e solidariedade e
informações de convivência.
10. A todos os docentes, discentes e funcionários do Departamento de
Ciência do Solo, que de alguma maneira contribuíram para realização deste
trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução geral	1
2 Revisão de literatura	3
2.1 Características dos solos de várzea.....	3
2.2 Alterações causadas pela inundação.....	4
2.3 Fósforo em solos inundados.....	6
2.3.1 Disponibilidade de fósforo em solos inundados.....	8
2.4 Níveis críticos de P nos solos e nas plantas.....	10
2.5 Alumínio e calagem em solos inundados.....	11
3 Referências bibliográficas.....	13
CAPÍTULO 2: Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem e níveis críticos de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados.....	19
Resumo.....	19
Abstract.....	20
1 Introdução.....	21
2 Material e métodos.....	22
3 Resultados e discussão.....	27
3.1 Produção de grãos.....	27
3.2 Perfilhamento	32
3.3 Níveis críticos de P na planta.....	35
4 Conclusões.....	38
5 Referências bibliográficas.....	38

CAPÍTULO 3: Níveis críticos e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz inundado.....	44
Resumo.....	44
Abstract.....	45
1 Introdução.....	46
2 Material e métodos	47
3 Resultados e discussão	50
3.1 Frações de P no solo.....	50
3.2 Disponibilidade de P pelos extratores Mehlich 1 e Resina.....	58
3.3 Níveis críticos de P no solo.....	62
4 Conclusões.....	66
5 Referências bibliográficas.....	66
ANEXOS	71

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem, níveis críticos e disponibilidade de P para o arroz em solos inundados. Lavras: UFLA, 1999. 74 p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia)

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, objetivando verificar o efeito residual da adubação fosfatada e da calagem realizados no cultivo do feijoeiro em sequeiro para o cultivo subsequente do arroz inundado, comparar a eficiência de extratores na avaliação do P disponível, determinar níveis críticos de P em quatro solos de várzea e em plantas de arroz, bem como identificar as frações de P no solo que estão contribuindo para a nutrição fosfatada do arroz inundado. Os solos de várzea utilizados foram: Glei Húmico (GH), Aluvial (A), Glei Pouco Húmico (GP) e Orgânico (O), este último artificialmente drenado. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em fatorial $4 \times 5 \times 2$ com três repetições, sendo quatro solos, cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm^{-3}) e dois níveis de calagem: ausência e presença. Os solos receberam uma adubação básica com macro e micronutrientes e foram inundados por 60 dias. Posteriormente, foram amostrados e avaliados para P por Mehlich 1 e resina e fracionamento de P. Cada parcela constituiu-se de um vaso de 3 dm^3 em que cultivaram-se duas plantas de arroz, nas quais foram avaliados a produção de grãos, a concentração de P, o peso da matéria seca da parte aérea e o perfilhamento na época da maturação, bem como os teores de P na folha bandeira à época do florescimento. O arroz respondeu em produção de grãos às doses de P e calagem aplicados em cada solo para o cultivo prévio do feijoeiro, verificando-se um efeito residual positivo. Os níveis críticos de P foliar para 90% da produção máxima variaram, respectivamente, para os solos GH, GP, O e A, na presença de calagem de 1,54; 2,14; 1,58 e $0,98 \text{ g kg}^{-1}$ e na ausência de calagem de 0,98; 1,09; 1,93 e $2,47 \text{ g kg}^{-1}$. As formas de P pouco lábeis também contribuíram para a nutrição fosfatada do arroz inundado. Os dois extratores utilizados foram eficientes para a determinação do P disponível dos solos. Os níveis críticos de P no solo variaram de 53 a 162 mg dm^{-3} na presença de calagem e de 50 a 135 mg dm^{-3} na ausência, dependendo mais da atividade dos óxidos de ferro do que do fator capacidade tampão de fosfato dos solos.

* Comitê orientador: Valdemar Faquin – UFLA (Orientador), Antônio Eduardo Furtini Neto – UFLA e Luiz Arnaldo Fernandes – UFLA.

ABSTRACT

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Residual effects of phosphorus and liming, critical levels and availability of phosphorus to rice plants cultivated in waterlogged soils. Lavras: UFLA, 1999. 74 p. (Dissertation - Master Program in Agronomy)*

This experiment was carried out in a greenhouse at the Department of Soil Science at the Federal University of Lavras, aiming to determinate responses from rice plants to residual P and liming, compare the performance of the extractors as for the evaluation of the available P, estimate critical P levels in four kinds of waterlogged soils and rice plants, as well as identify the fractions of P in the soil which contribute to feeding P to rice. The soils types studied that comprise Low Humic Gley (GP), Aluvial (A), Humic Gley (GH) and Bog Soil (O) classes, the latter having been artificially drained. A completely randomized type of experimental design was adopted, in a factorial scheme, four types of soils having been used, five P doses (75, 150, 300, 500 and 800 mg.kg⁻¹) with liming and otherwise, with three replications. The soils were thoroughly mixed with macro and micronutrients, being submitted to 60 days of waterlogging, afterwards. Latter, the soil portions were sampled and evaluated as for P by Mehlich 1 and resin, and P fractionation. Two rice plants were cultivated in 3 (three) dm³ pots. Grain yield, top dry matter weight, the P rate in top plants and branch out at the end of the cycle, as well as P rate in plant leaves at the flowering period were determined. The results indicated responses from rice plants, in the grain yield to residual P and liming doses applied to each soil portion for a previous bean plant cultivar, thus allowing to verify a positive residual effect. The critical levels of P for 90% of the production varied and resulted, respectively, in presence of liming, from 1.54 to 2.14, 1.58 and 0.98 g.kg⁻¹ and in the absence of liming, from 0.98 to 1.09, 1.93 and 2.47 g.kg⁻¹. The moderately labile P of the soils also contributed to feeding waterlogged rice with P. The two tested extractors proved to be efficient as for the evaluation of available P for the rice cultivated in lowland waterlogged soils. The variation on critical P levels in the soils ranged from 53 to 162 mg dm⁻³ in presence of liming and from 50 to 135 mg dm⁻³ in absence of liming showing to dependent more on the activity of iron oxides in lowland soils than on the buffering capacity of phosphate.

* Guidance Committee: Valdemar Faquin - UFLA (Major Professor), Antônio Eduardo Furtini Neto - UFLA and Luiz Arnaldo Fernandes - UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil existem cerca de 30 milhões de hectares de várzeas irrigáveis. Desse total, 1,5 milhão encontra-se no estado de Minas Gerais, sendo 200.000 hectares localizados no sul do estado. Após a criação do Programa de Aproveitamento Racional de Várzeas Irrigáveis - PROVÁRZEAS, em 1981, milhares de hectares de várzeas foram incorporadas ao processo produtivo brasileiro, sendo Minas Gerais o estado onde ocorreu maior sistematização de áreas.

A exploração desses recursos representa uma boa alternativa para expansão da fronteira agrícola. A topografia favorável à mecanização e a disponibilidade de água caracterizam as várzeas como potencialmente produtivas. Seu uso racional, entretanto, deve obedecer a critérios técnicos que permitam maximizar a produtividade com eficiência econômica e minimizar os impactos ambientais decorrentes da atividade agrícola.

Os solos de várzea são originados de materiais de grande heterogeneidade em sua composição granulométrica e mineralógica e estão sujeitos a inundação contínua ou periódica. Sendo assim, apresentam muitos atributos diferentes daqueles verificados em solos sob condições de boa drenagem, destacando-se a reação do solo, as condições de óxido-redução, o acúmulo de matéria orgânica e o desenvolvimento de microrganismos anaeróbicos. Além disso, esses solos apresentam limitações quanto à fertilidade, e, para serem racionalmente explorados, devem ser conhecidas suas limitações, bem como sua capacidade de suprir nutrientes para as plantas.

No Brasil, a cultura do arroz ocupa o terceiro lugar em área colhida e o quarto em produção, reflexo de sua importância na dieta básica da população brasileira. O sistema de cultivo por inundação ocupa aproximadamente 20% das

áreas cultivadas com arroz, respondendo por 40% da produção brasileira. A baixa produtividade média nacional é devida, em grande parte, ao predomínio do sistema de cultivo sob sequeiro. Nesse contexto, a cultura do arroz inundado parece ser uma boa alternativa à utilização racional dos solos de várzea.

O aproveitamento residual de fertilizantes e corretivos é um dos principais benefícios da diversificação de culturas em várzeas. No período chuvoso, o excesso de água e as dificuldades de drenagem apontam o arroz como a principal opção e, no período da seca, espécies como feijão, trigo, ervilha e outras podem ser cultivadas com colheitas satisfatórias (Moraes e Dynia, 1992). Porém, o cultivo do arroz inundado traz como consequências uma série de alterações físico-químicas ao solo que afetam a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes para culturas sob sequeiro.

De maneira geral, o fósforo (P) é o nutriente que mais tem limitado a produção das culturas nos solos brasileiros, o que tem sido comprovado também em solos de várzea para diferentes culturas (Baligar e Fageria, 1996; Santos e Silveira, 1996; Andrade, C.A., 1997 e Andrade, W.E., 1997). Explica-se essa situação pela carência generalizada de P nos solos brasileiros e, também, pela forte interação do elemento com os componentes do solo. Assim, torna-se necessário conhecer essas interações e entender a dinâmica das formas disponíveis para as plantas.

O comportamento do P num solo inundado difere substancialmente daquele observado num solo bem drenado. As condições criadas pela inundação, influenciam as transformações do fósforo no solo ocasionando, de modo geral, um aumento na sua disponibilidade (Brandon e Mikkelsen, 1979). Porém, essa situação pode se reverter completamente quando o solo é drenado, devido ao aumento da capacidade do solo em adsorver fósforo (Willett, 1979), diminuindo sua disponibilidade para as culturas de sequeiro.

A calagem tem sido apontada como uma prática eficiente para atenuar problemas de toxidez de Fe para o arroz em solos inundados. Porém, não se sabe bem ao certo de que modo essa prática pode afetar a disponibilidade de fósforo para o arroz sob inundação. Trabalhos recentes têm demonstrado problemas com parâmetros para recomendação de calagem e adubação fosfatada para o arroz inundado (Guilherme, 1990; Mello, 1991 e Borges Júnior et al., 1998).

Diante do grande potencial que representam os solos de várzea no Brasil e da necessidade de estudos nesses sistemas, objetivou-se, com este trabalho: verificar o efeito residual da adubação fosfatada e da calagem no cultivo do feijoeiro em sequeiro para o cultivo subsequente do arroz inundado; comparar a eficiência de extratores na avaliação do P disponível; determinar níveis críticos de P em quatro solos de várzea e em plantas de arroz, bem como identificar as formas de P no solo que podem contribuir para a nutrição fosfatada do arroz inundado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características dos solos de várzea

As várzeas ou planícies de inundação são áreas de baixada localizadas às margens dos rios e lagos, cujos solos originaram-se de deposição de material transportado por curso d'água ou trazido das encostas por efeito erosivo das chuvas (Curi, Resende e Santana, 1988). Devido a origem diversa desses materiais, apresentam grande variação quanto aos seus atributos químicos, físicos e biológicos.

Pelo excesso de umidade e sua localização no relevo, de maneira geral os solos de várzea apresentam um acúmulo de matéria orgânica em sua camada superficial. O processo de gleização dá-se em camadas inferiores, onde ocorre a

redução ou a remoção do ferro, conferindo ao solo uma coloração cinza, o que caracteriza a ausência de compostos oxidados (Curi, Resende e Santana, 1988).

Conforme o sistema Brasileiro de Classificação de Solos - Embrapa (1982), os solos típicos de várzea em Minas Gerais podem ser enquadrados principalmente nas classes Aluvial (A), Glei Pouco Húmico (GP), Glei Húmico (GH) e Orgânico (O). Nessa seqüência, quando se consideram os atributos desses solos, há uma tendência ao aumento de teor de matéria orgânica, deficiência de arejamento e altura e estabilidade relativa do nível de água (Curi, Resende e Santana, 1988).

Geralmente, as várzeas possuem uma boa topografia, facilidade de mecanização e irrigação, mas, apresentam limitações ao uso agrícola, devido ao excesso de água e ou baixa fertilidade natural.

O meio reduzido resultante da inundação provoca alterações químicas e eletroquímicas que estão direta ou indiretamente relacionadas com a disponibilidade de nutrientes ou substâncias tóxicas aos organismos que se desenvolvem no meio. Para um melhor aproveitamento da cultura do arroz inundado, torna-se necessário um maior conhecimento da dinâmica dos nutrientes nesses sistemas.

2.2 Alterações causadas pela inundação

A presença de uma lâmina d'água sobre a superfície de um solo inundado o isola do ar atmosférico. O oxigênio e outros gases atmosféricos penetram no solo somente por difusão da água intersticial. A baixa taxa de renovação de O_2 através da água de inundação mantém oxidada uma fina camada na superfície, porém, é insuficiente para manter a demanda dos organismos aeróbicos. Nessas condições, a decomposição da matéria orgânica é feita mais lentamente pela presença de organismos anaeróbicos e os produtos

finais são bastante diferentes daqueles obtidos na decomposição aeróbica, dando início a uma série de modificações químicas.

As formas oxidadas no meio redutor servem como receptores de elétrons na respiração microbiana e, nesta seqüência, sofrem redução: O_2 para H_2O , NO_3^- para N_2 , Mn^{4+} para Mn^{2+} , Fe^{3+} para Fe^{2+} , SO_4^{2-} para S^{2-} , CO_2 para CH_4 e H^+ para gás H_2 . A redução desses compostos resulta em decréscimos do potencial redox e, em se tratando de solos ácidos, aumentos do pH, principalmente devido a redução de óxidos mangânicos e hidróxidos férricos que consomem H^+ (Ponnamperuma, 1972). Já para solos alcalinos, a decomposição microbiológica da matéria orgânica produz ácidos orgânicos e CO_2 , o qual reage com água para formar ácido carbônico, que dissocia-se em íons H^+ e HCO_3^- , decrescendo seu pH (Ponnamperuma et al., 1966).

Tanto solos ácidos quanto alcalinos tendem à neutralidade após algum tempo de inundação. A intensidade de variação do pH é dependente de seu valor inicial no solo, da quantidade e natureza dos compostos orgânicos presentes e do teor e grau de cristalinidade dos óxidos de Fe. Geralmente, são atingidos valores entre 6,5 e 7,5, quando o potencial redox se estabiliza (Patrick Jr. e Reddy, 1978). Nessa faixa de pH, estabelecem-se condições para a reprecipitação do Fe^{2+} mobilizado pela redução (Ponnamperuma et al., 1967) e então a concentração de Fe^{+2} em solução declina rapidamente. Por essa razão, em solos ácidos, muito ferro é reduzido antes que sejam atingidos valores de pH suficientemente altos para reprecipitar o Fe^{2+} em solução. Por outro lado, em solos levemente ácidos, pequenas quantidades de Fe^{2+} são suficientes para que o pH aumente a ponto de permitir a reprecipitação (Mello, 1991).

O doador de elétrons para a respiração dos organismos do solo é a matéria orgânica. Quanto mais rico em matéria orgânica é um solo, mais intensa é sua condição de redução quando inundado, que pode acarretar em grande produção e acúmulo de ácidos orgânicos e H_2S , detrimenais ao

desenvolvimento e absorção de nutrientes pelas plantas (Rao e Mikkelsen, 1977), bem como a toxicidade de Fe^{2+} e Mn^{2+} .

Os óxidos de Fe mal cristalizados, facilmente redutíveis, chamados de Fe ativo, também intensificam as condições de redução do solo. Um solo rico em matéria orgânica pode apresentar menor intensidade de redução quando possui baixos teores de Fe ativo, verificando-se o oposto em solos com altos teores (León e Arrogocés, 1981).

Segundo Kämpf (1988), é possível prever a atividade dos óxidos de ferro dos solos através da relação Fe_o/Fe_d . O ferro simbolizado por Fe_o diz respeito aos óxidos de Fe mal cristalizados, como, por exemplo, a ferrihidrita e certas lepidocrocitas, extraídas com oxalato de amônio ácido no escuro (McKeague, 1978). O ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Mehra e Jackson, 1960) corresponde aos óxidos de ferro “livres” (Fe_d) cristalinos e não cristalinos, como, por exemplo, hematita, goethita, lepidocrocita e ferrihidrita. Quanto maior for o valor da relação Fe_o/Fe_d , pior o grau de cristalinidade dos óxidos, menor sua estabilidade termodinâmica e maior sua atividade no solo.

2.3 Fósforo em solos inundados

O fósforo não está diretamente envolvido em reações de óxido-redução, porém, devido à sua reatividade com compostos facilmente redutíveis, seu comportamento é significativamente afetado pela inundação.

Geralmente, verifica-se um aumento na disponibilidade de fósforo pela inundação do solo, que é atribuída à redução do fosfato férrico a ferroso, hidrólise dos fosfatos de ferro e alumínio por agentes quelantes oriundos da decomposição anaeróbica, liberação do fósforo da matéria orgânica, solubilização do fosfato de cálcio em solos calcários, liberação do fosfato ocluso em óxidos de ferro hidratados (Ponnanperuma, 1972), e aumento na difusão do

fósforo (Turner e Gilliam, 1976). Porém, esse aumento na disponibilidade ocorre somente se a solução estiver inicialmente pobre em fósforo, como é o caso da maioria dos solos de várzea. Quando o teor de P em solução for maior ou igual que 5-10 mg L⁻¹, o solo reduzido adsorverá mais P da solução que o solo oxidado (Patrick e Khalid, 1974), diminuindo sua disponibilidade.

As reações de redução, hidrólise e solubilização de compostos, que afetam o teor de P em solução, são dependentes do pH do solo. Sob condições de redução, a máxima solubilidade do fosfato ocorre a baixo pH acompanhando a redução dos compostos férricos a ferrosos. Nestas condições, o ferro ferroso solúvel não consegue remover fosfato da solução, situação que se reverte com o aumento do pH, pela formação de óxidos de ferro insolúveis e hidróxidos capazes de readsorver o fosfato (Lindsay, 1979).

A matéria orgânica exerce um efeito tamponante com relação à elevação do pH em solos inundados. Guilherme, Curi e Guedes (1989) observaram que solos com menor teor de matéria orgânica apresentaram maior elevação nos valores de pH com a inundação e decréscimos na absorção de P pelo arroz.

Além das formas inorgânicas, o P orgânico também pode contribuir na nutrição de plantas sob condições de redução. Campbell e Racz (1975) demonstraram uma maior mineralização de fósforo orgânico em solos sob inundação quando comparados a solos mantidos com teor próximo a capacidade de campo. Koyama, Chammex e Niamsrichand (1973) evidenciaram ainda a possibilidade de bactérias da rizosfera do arroz mineralizarem o fósforo orgânico, tornando esse nutriente disponível para a planta.

A disponibilidade de P em solos de várzea é significativamente afetada por ciclos alternados de umedecimento e secagem. Quando um campo de arroz inundado é drenado, ocorre a reoxidação dos compostos reduzidos do solo com mudanças no Eh, pH e concentração de Fe⁺² (Sayal e De Datta, 1991). Nessas condições, o decréscimo da disponibilidade de P no solo está associado ao

aumento da capacidade dos óxidos de ferro em adsorvê-lo (Willett, 1979), o que causa sérios problemas para as culturas subseqüentes (Brandon e Mikkelsen, 1979).

2.3.1 Disponibilidade de fósforo em solos inundados

O P na planta encontra-se na forma inorgânica como ortofosfato e pirofosfato (menor quantidade), e na forma orgânica como ésteres de carboidratos, fosfolipídeos, nucleotídeos e ácido fítico. É considerado essencial para o desenvolvimento das plantas por participar de compostos que armazenam e transferem energia em processos metabólicos e por fazer parte da estrutura das membranas plasmáticas e da fitina, composto de reserva envolvido na germinação de sementes. Para o ótimo crescimento das plantas, seu requerimento varia de 1 a 5 g kg⁻¹ na matéria seca, dependendo da espécie e do órgão analisado (Faquin, 1994).

Nos solos, o P se encontra na forma orgânica e mineral. O P orgânico ocorre em teores proporcionais à matéria orgânica. Na forma mineral, a proporção relativa dos compostos inorgânicos de P com Fe, Al e Ca é condicionada pelo pH, tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila, e condições de drenagem.

Um solo, quando inundado, sofre alterações na distribuição das frações de P, aumentando geralmente a quantidade de P-Fe (Mahapatra e Patrick, 1969). A quantidade de fosfato de cálcio pode aumentar ou diminuir com a inundação em função do pH e teores de matéria orgânica e Ca inicial no solo (Mahapatra e Patrick, 1969; Singh e Singh 1976; Sah e Mikkelsen, 1986). Singh e Singh (1976) verificaram decréscimos nas quantidades de fosfato de cálcio durante a inundação, enquanto que Sah e Mikkelsen (1986) registraram um aumento nessas frações quando da inundação de solos que apresentavam, inicialmente, altos teores de fosfato de cálcio.

Geralmente, verifica-se um aumento nas frações de P lábil com a inundação dos solos (Moraes, 1973 e Patel, 1975). Esse aumento deve-se, provavelmente, à conversão de formas não disponíveis, como, por exemplo, o P ocluso em solos ácidos ou fosfatos de cálcio em solos alcalinos, a formas mais disponíveis pela redução do solo (Mello, 1991).

De modo geral, a maior porção dos fosfatos adicionados em solos ácidos é extraído na forma de fosfatos de ferro e alumínio (Al-Abbas e Barber, 1964; Bache, 1963). Portanto, um extrator com tendência de dissolução seletiva para fosfatos de ferro e alumínio pode fornecer uma boa avaliação do P disponível em solos ácidos.

Os métodos utilizados na avaliação do P disponível para o arroz de sequeiro têm sido testados para o arroz inundado. No entanto, dentre os extratores utilizados, os ácidos têm mostrado pouca eficiência na predição do P disponível para o arroz sob inundação (Grande, Curi e Quaggio, 1986 e Motta et al., 1994), provavelmente por extraírem preferencialmente P-Ca, havendo um predomínio de P-Fe nesses sistemas (Raij, 1991). Além disso, muitos solos sob inundação, tal como os de várzea, apresentam níveis altos de matéria orgânica que interferem na extração quando se utilizam métodos ácidos (Blanco et al., 1964), provocando uma superestimação do P disponível.

Embora o método Olsen + EDTA apresente maior capacidade de extração de P, a Resina é o método mais promissor na avaliação do P disponível em solos de várzea, sendo menos influenciado por variações nos teores de matéria orgânica e textura (Motta et al., 1994). Outros trabalhos também apontam a Resina como o método mais adequado na predição do P disponível em solos sob inundação (Grande, Curi e Quaggio, 1986).

O comportamento químico do P nos solos inundados é complexo, devido ao envolvimento indireto desse nutriente nas reações de óxido-redução de outros elementos. Por isso mesmo, ele deve ser melhor descrito pela

abordagem de suas formas no solo através de uma extração seletiva por vários reagentes, conhecida como fracionamento de fósforo (Hedley, Steward e Chauhan, 1982). As formas de P extraídas são primeiramente as lábeis seguidas das mais estáveis. Em cada fase da extração são extraídas tanto formas orgânicas quanto inorgânicas de P, que são separadas em diversas frações: a) P lábil inorgânico, b) P na biomassa microbiana, c) P lábil orgânico, d) fosfato de cálcio, e) fosfatos de ferro e alumínio, f) P orgânico ligado a ácidos húmico e fúlvico, g) P residual insolúvel (Ivanoff, Reddy e Robinson, 1998).

O conhecimento das frações de P relacionadas com o P disponível obtido pelos extratores permite identificar as frações extraídas preferencialmente em determinado solo e, conseqüentemente, escolher o método mais adequado para uma área particular.

2.4 Níveis críticos de P nos solos e nas plantas

Sabe-se que a inundação promove a solubilização de compostos fosfatados, tomando o P mais disponível às plantas (Ponnamperuma, 1972), além de facilitar a difusão do P para as raízes (Turner e Gilliam, 1976). Uma revisão realizada por Broeshart e Brunner (1964) sobre trabalhos em oito países da África, Ásia e Europa indica que o aproveitamento do adubo fosfatado pelo arroz é maior sob condições de sequeiro do que inundação, fato que os autores atribuíram ao aumento na disponibilidade do P nativo do solo inundado. Sendo assim, níveis críticos no solo estabelecidos para arroz inundado não podem ser extrapolados para arroz de sequeiro e vice-versa, devido à diferença na disponibilidade do nutriente encontrada entre os dois tipos de cultivo.

No Brasil, vários autores têm sugerido que tanto os níveis críticos de P no solo e na planta, quanto as recomendações de adubação dependem da capacidade tampão de fosfatos dos solos (Freire, Novais e Neves, 1985; Muniz et al., 1985; Fabres et al., 1987). Em solos inundados, pode-se supor que são

válidas as mesmas considerações feitas para solos bem drenados. Mello (1991), por exemplo, demonstrou que os níveis críticos de P no solo e na planta para o arroz irrigado estavam relacionados com a capacidade tampão de fosfatos dos solos. Contudo, deve-se ressaltar que, ao contrário do que ocorre em solos bem drenados, a capacidade tampão de fosfatos não é uma característica estável em solos inundados. Conforme se pode deduzir do trabalho de Holford e Patrick Jr. (1979), a capacidade tampão e o fator quantidade de fosfato no solo variam em função do tempo de inundação.

Pesquisas sobre nível crítico no solo para arroz irrigado ainda são escassas. Mello (1991) encontrou níveis de 16,6 a 39,4 mg dm³ de P obtidos por Mehlich 1 em nove solos inundados, considerados críticos para o crescimento do arroz. No entanto, o mesmo autor verificou que os níveis críticos de P no solo apresentavam amplas variações quando o P disponível foi determinado por diferentes extratores. Assim, seus valores estimados parecem depender não só dos fatores quantidade e capacidade tampão dos fosfatos, mas também do método de extração utilizado na recuperação do P dos solos.

2.5 Alumínio e calagem em solos inundados

A redução dos solos ácidos pela inundação propicia um aumento de pH com conseqüente neutralização do alumínio trocável. Os óxidos de alumínio tornam-se estáveis no sistema, sendo a calagem dispensável nessas condições. Porém, a calagem tem sido preconizada sob o aspecto nutricional de Ca e Mg e como medida de controle da toxidez de Fe e Mn (Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka, 1987 e Mello et al., 1992). No campo, quando a inundação é tardia, a prática da calagem também pode favorecer o desenvolvimento inicial das plantas de arroz pela diminuição dos teores de alumínio trocável em solos ácidos (Ramos, 1985).

Em cultura irrigada por inundação em solos ácidos e com baixos teores de Ca e Mg podem ocorrer respostas do arroz à calagem (Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka, 1987). A manutenção de teores equilibrados de Ca e Mg no solo através de adubação e calagem adequadas, é um princípio básico para se evitar indução de deficiência desses elementos, além de outros, ressaltando que a presença de Mg no meio, dentro de limites, favorece a absorção de P pelas plantas (Faquin, 1994). Porém, em solos com níveis baixos de P, é menos provável obter-se respostas positivas na produção de matéria seca pelo arroz inundado elevando-se os níveis de Ca e Mg com calcário (Vahl, Gomes e Botelho, 1978). Em solo Glei Pouco Húmico com elevados teores de Mg + Ca e P-resina, verificou-se um efeito altamente significativo da calagem sobre a produção de matéria seca de plantas de arroz cultivadas sob inundação (Guilherme, Curi e Guedes, 1989).

O efeito da calagem sobre a nutrição fosfatada do arroz é variável e depende das características dos solos inundados (Pereira, 1985; Guilherme, Curi e Guedes, 1989). Em solos ácidos de alta capacidade tampão de fosfato e com altos teores de óxidos de Al, pode-se esperar um aumento na disponibilidade de P com a calagem. Por outro lado, em solos de baixa capacidade tampão e com altos teores de óxidos de Fe, espera-se o oposto (Mello, 1991).

A calagem pode estabilizar os óxidos de Fe e Mn em solos reduzidos (Mello et al., 1992), diminuindo a solubilidade desses elementos, evitando uma possível toxidez às plantas. Porém, observou-se que os teores de Fe e Mn redutíveis não tiveram efeito significativo na definição das doses de calcário recomendáveis para o arroz inundado, sendo considerados critérios inadequados (Borges Júnior et al., 1998).

Quando um solo inundado é drenado, há diminuição dos valores de pH e as formas trocáveis do Al voltam a exercer efeitos tóxicos às plantas, constituindo também a principal fonte de acidez. As formas não trocáveis do Al,

embora não exerçam efeitos fitotóxicos diretos, atuam no tamponamento do pH do solo e afetam a atividade do Al^{3+} em solução (Bloom, McBride e Weaver, 1979). Considerando esses aspectos, a calagem é indispensável para a neutralização do alumínio em solos que estão submetidos a inundação periódica.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-ABBAS, A.H.; BARBER, S.A. A soil test for phosphorus based upon fractionation of soil phosphorus: I. Correlation of soil phosphorus fraction with plant-available phosphorus. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.28, n.2, p.218-221, Mar./Apr. 1964.
- ANDRADE, C.A. de B. Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos de várzea do sul de Minas Gerais. Lavras: UFLA, 1997b. 107p. (Tese – Doutorado em Fitotecnia).
- ANDRADE, W.E. de B. Limitações nutricionais para a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) e do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em cultivo sucessivo em solo de várzea da região Norte Fluminense. Lavras : UFLA, 1997a. 125p. (Tese – Doutorado em Fitotecnia).
- BACHE, B.N. Aluminum and iron phosphate studies relating to soil. I. Solution and hydrolysis of variscite and strengite. *Soil Science Journal*, London, v.14, p.113-123, 1963.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Nutrient use efficiency in acid soils. Nutrient management and plant use efficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOIL-PLANT INTERACTION AT LOW PH, 4., 1996, Belo Horizonte. *Proceedings...*Dordrecht: Kluwer, 1996.
- BARBOSA FILHO, M.; 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, v.11, n.2, p.147-155, maio/ago. 1987.
- BLANCO, H.G.; WUTKE, C.P.; AMARAL, A.J.; IGUE, K.; VERDADE, F.C. Fertilidade de alguns solos de várzea do Vale do Paraíba. *Bragantia*, Campinas, v.23, n.6, p.55-63, fev. 1964.

- BLOOM, P.R.; McBRIDE, M.B.; WEAVER, R.M.** Aluminum organic matter in acid soil: salt-extractable aluminum. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.43, n.4, p.813-815, July/Aug. 1979.
- BORGES JÚNIOR, M.; MELLO, J.W.V.; RIBEIRO, A.C.; SOARES, P.C.** Avaliação de critérios para calagem de arroz inundado em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.2, p.281-289, abr./jun. 1998.
- BRANDON, D.M.; MIKKELSEN, D.S.** Phosphorus transformations in alternately flooded California soils: I. Causes of plant phosphorus deficiency in rice rotation crops and correctional methods. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.43, n.5, p.989-994, Sept./Oct. 1979.
- BROESHART, H.; BRUNNER, H.** The efficiency of phosphate and nitrogen fertilization in rice cultivation. *Trans. 8th Int. Congr. Soil Science*, Bucharest, Romania, v.4 p. 209-218, 1964.
- CAMPBELL, L.B.; RACZ, G.J.** Organic and inorganic P content, movement and mineralization of P in soil beneath a feedlot. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.55, n.4, p.457-466, Nov. 1975.
- CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D.P.** Solos de várzea de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.13, n.152, p.3-10, mar. 1988. (Exploração Racional de Várzea - II).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.** Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, 1982. 526p. (Boletim de Pesquisa, 1).
- FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F. de; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; CORDEIRO, A.T.** Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.11, n.4, p.51-57, jan./abr. 1987.
- FAQUIN, V.** Nutrição mineral de plantas. Lavras: ESAL/FAEPE, 1994. 277p.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de fósforo para o crescimento de estílozantes como função do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Ceres, Viçosa*, v.32, p.488-499, nov./dez. 1985.

GRANDE, M.A.; CURT, N.; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.10, n.4, p.45-50, jan./abr. 1986.

GUILHERME, L.R.G. Calagem e inundação em solos de várzea cultivados com arroz: alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxofre. Lavras: ESAL, 1990. 113p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

GUILHERME, L.R.G.; CURT, N.; GUEDES, G.A.A. Calagem e disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado cultivado em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.13, n.3, p.341-347, set./dez. 1989.

HEDLEY, M.J.; STEWARD, W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v.46, n.5, p.970-976, Sept./Oct. 1982.

HOLFORD, I.C.R.; PATRICK JR., W.H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in acid soil. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v.43, n.2, p.292-297, Mar./Apr. 1979.

IVANOFF, D.B.; REDDY, R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science, Florida*, v.163, n.1, p.36-45, jan. 1998.

KAMPF, N. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., 1988, Goiânia. *Anais...Goiânia: EMBRAPA - CNPAF*, 1988. p.35-71. (EMBRAPA - CNPAF. Documentos, 22)

KOYAMA, T.; CHAMMEK, C.; NIAMSRICHAND, N. Nitrogen application technology for tropical rice as determined by field experiments using ¹⁵N tracer technique. Tokyo: Ministry of Forestry and Agriculture, 1973. (Tropical Agriculture Research Center Technical Bulletin 3).

LÉON, L.A.; ARREGOCÉS, O. Química de los suelos inundados - guia de estudio. Cali, Colombia: CIAT, 1981. 35p.

- LINDSAY, W.L.** Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley, 1979. 449p.
- MAHAPATRA, I.C.; PATRICK, W.H.** Inorganic phosphate transformation in waterlogged soils. *Soil Science*, Madison, v.107, n.4, p.281-288, Apr. 1969.
- Mc KEAGUE, J.A. (ed.)** Manual on soil sampling and methods of analysis. 2. ed. Ottawa: Canadian Society of Soil Science, 1978. 212 p.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, N.L.** Iron oxide removal from soils and clys by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, Clarkson, v.3, p.317-327, 1960.
- MELLO, J.W.V.** Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados. Viçosa: UFV, 1991. 212p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MELLO, J.W.V.; FONTES, M.P.F.; RIBEIRO, A.C.; ALVAREZ V., V.H.** Inundação e calagem em solos de várzea: I. Alterações em pH, Eh e teores de Fe^{2+} e Mn^{2+} em solução. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.3, p.309-317, set./dez. 1992.
- MELLO, J.W.V. de; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.** Concentrações críticas de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n.2, p.211-216, maio/ago. 1993.
- MORAES, J.F.V.** Efeitos da inundação do solo. I. Influência sobre o pH, o potencial de óxido redução e a disponibilidade de fósforo no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Piracicaba, v.8, n.7, p.93-101, 1973.
- MORAES, J.F.V.; DYNIA, J.F.** Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico sob inundação e após a drenagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.2, p.223-235, fev.1992.
- MOTTA, A.C.V.; CARVALHO, J.G.; GUEDES, G.A.A.; CURI, N.** Comparação entre métodos para avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. *Ciência e Prática*, Lavras, v.18, n.4, p.349-365, out./dez. 1994.

- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, n.3, p.237-243, set./dez. 1985.
- PATEL, M.S. Phosphorus availability in lowland rice fields. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, New Delhi, v.23, p.458-464, 1975.
- PATRICK JR., W.R.; KHALID, R.A. Phosphorus release and sorption by soils and sediments: Effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science*, Washington, v.186, n.4158, p. 53-55, Oct. 1974.
- PATRICK JR., W.H.; REDDY, C.N. Chemical changes in rice soils. In: BRADY, N.C. Soils and rice. Los Baños: International Rice Research Institute, 1978. p.361-379.
- PEREIRA, L.F. Efeitos da aplicação de calcário, fósforo e zinco no crescimento e nutrição do trigo (*Triticum aestivum* L.) e arroz (*Oriza sativa* L.) em dois solos de várzea do Estado de Minas Gerais. Lavras: ESAL, 1985. 135p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, v.24, p.28-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N.; MARTINEZ, E.; LOY, T. Influence of redox potential and partial pressure of carbon dioxide on pH values and the suspension effect of flooded soils. *Soil Science*, Madison, v.101, n.6, p.421-431, June, 1966.
- PONNAMPERUMA, F.N.; TIANCO, E.M.; LOY, T. Redox equilibria in flooded soils: I. The iron hydroxide system. *Soil Science*, Madison, v.103, n.3, p.374-382, June, 1967.
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: POTAFOS, 1991, 343p.
- RAMOS, M.G. Manual de produção de arroz irrigado. Florianópolis: EMPASC/ACARESC, 1985. 225p.
- RAO, D.N.; MIKKELSEN, D.S. Effect of acetic, propionic and butyric acids on young rice seedling's growth. *Agronomy Journal*, Madison, v.69, n.6, p.923-928, Nov./Dec. 1977.

- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.** Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, n.1, p.62-67, Jan./Feb. 1986.
- SANTOS, A.B.; SILVEIRA, P.M.** Cultivo em várzeas. In: **ARAUJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.S.; ZIMMERMANN, M.J.O.**, eds. *Cultura do feijoeiro comum no Brasil*. Piracicaba: POTAFOS, 1996. p.589-617.
- SAYAL, S.K.; DE DATTA, S.K.** Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, v.16, p.2-120, 1991.
- SINGH, S.; SINGH, S.B.** Effect of waterlogging and organic matter on inorganic P fractions of soils. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v.24, p.88-90, 1976.
- TURNER, F.T.; GILLIAN, J.W.** Increased P diffusion as na explanation of increased P availability in flooded rice soils. **Plant and Soil**, The Hague, v.45 p. 365-377, 1976.
- VAHL, L.C.; GOMES, A.S.; BOTELHO, R.C.** Influência do Ca, Mg, Zn e P sobre o rendimento e outras características da cultura do arroz irrigado. **Agros, Pelotas**, v.13, p.65-75, 1978.
- WILLETT, I.R.** The effects of flooding for rice culture on soil chemical properties and subsequent maize growth. **Plant and Soil**, The Hague, v.52, n.3, p.373-383, Aug. 1979.

CAPÍTULO 2

EFEITO RESIDUAL DA ADUBAÇÃO FOSFATADA E DA CALAGEM E NÍVEIS CRÍTICOS DE P EM PLANTAS DE ARROZ CULTIVADAS EM SOLOS INUNDADOS

RESUMO

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem e níveis críticos de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. Lavras: UFLA, 1999. 74p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia)

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de avaliar o efeito residual de doses de P e da calagem no crescimento e produção do arroz inundado e ainda estimar os níveis críticos de P nas plantas. Foram utilizados quatro solos de várzea pré-cultivados com feijoeiro: Glei Pouco Húmico (GP), Aluvial (A), Glei Húmico (GH) e Orgânico (O), este último artificialmente drenado. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em fatorial $4 \times 5 \times 2$ com três repetições sendo quatro solos, cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm⁻³) e dois níveis de calagem: ausência e presença. Os solos receberam uma adubação básica com macro e micronutrientes e foram inundados por 60 dias. Cada parcela constituiu de um vaso de três dm³ em que cultivaram-se duas plantas, nas quais foram avaliados a produção de grãos e o perfilhamento na época da maturação, e os teores de P na folha bandeira à época do florescimento. De modo geral, o arroz respondeu em produção de grãos às doses de P e calagem aplicados nos solos para o cultivo prévio do feijoeiro, verificando-se um efeito residual positivo, sendo que somente no solo A não ocorreu resposta do arroz à calagem. Os níveis críticos de P foliar para 90% da produção máxima variaram entre os solos de várzea estudados e corresponderam a 0,98; 1,09; 1,93 e 2,47 g kg⁻¹ na ausência de calagem para os solos GH, GP, O e A e a 1,54; 2,14; 2,70 e 0,98 g kg⁻¹ na presença de calagem para os mesmos solos, respectivamente.

ABSTRACT

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Residual effect of phosphorus and liming and phosphorus critical levels in rice plants cultivated in waterlogged soils. Lavras: UFLA, 1999. 74p. (Dissertation – Master Program in Agronomy)

This experiment was carried out in a greenhouse at the Department of Soil Science at the Federal University of Lavras, aiming to determinate responses from rice plants to residual P and liming, and the critical P levels in the leaves of rice plants. The soil types studied, which comprise the Low Humic Gley (GP), Aluvial (A), Humic Gley (GH) and Bog Soil (O) classes were previously used for bean plant cultivars. A completely randomized type of experimental design was used, in a factorial scheme, four types of soils having been used, five P doses (75, 150, 300, 500 and 800 mg/kg) with and without liming, with three replications. The soils were thoroughly mixed with macro and micronutrients and submitted to 60 days of waterlogging, afterwards. Each portion consisted of a 3 (three) dm³ pot in which two plants were cultivated. Grain yield and branch-out at the end of the cycle, and the contents of P in plant leaves at the flowering period were determined. The results indicated responses in grain yield from rice plants to residual P and liming. As for the plants, the critical P levels varied from 0.98 to 1.09, 1.93 and 2.47 g/kg In the absence of liming for GH, GP, O and A and from 1.54 to 2.14, 2.70 and 0.98 g/kg In the presence of liming for the same soils, respectively.

INTRODUÇÃO

O aproveitamento residual de fertilizantes e corretivos é um dos principais benefícios da diversificação de culturas. O fósforo aplicado no solo tem demonstrado efeitos residuais positivos e significativos para diversas culturas, provavelmente por estar mais relacionado ao fator capacidade dos solos e por ser pouco requerido pelas plantas em relação aos outros macronutrientes (Rao et al., 1991; Dhillon e Bahl, 1992; Ramamurthy e Schivashankar, 1996; Masthan, Mohammad e Reddy, 1998).

Em solos de várzea, os efeitos são variados. Enquanto alguns trabalhos apontam resultados benéficos do fósforo residual para o arroz inundado (Verma, Shrama e Singh, 1981; Medhi, Datta e De Datta, 1997) outros relatam nenhum efeito residual positivo de adubação fosfatada para essa cultura (Machado et al., 1985; Fageria, Santos e Zimmerman, 1999).

Não se sabe ao certo de que modo a absorção de P pelas plantas de arroz e os níveis críticos de P em seus tecidos são influenciados por variações que ocorrem no fator capacidade dos solos com a inundação, pois a capacidade tampão de fosfato não é uma característica estável em solos inundados (Roy e De Datta, 1985). Segundo Moura Filho (1990), os níveis críticos de P nos tecidos de plantas de arroz cultivadas em solos inundados não estão relacionados com a capacidade tampão dos fosfatos dos solos. Porém, Mello et al. (1993) observaram correlações significativas entre os níveis críticos de P na planta de arroz e a capacidade tampão do solo mais evidentes na presença de calagem do que na ausência.

O efeito da calagem sobre a nutrição fosfatada do arroz é variável e depende da capacidade tampão dos solos inundados. Embora alguns trabalhos tenham demonstrado efeito nulo da calagem sobre o rendimento do arroz (Leite

et al., 1970; Fageria, Zimmerman e Lopes, 1977), aumentos significativos na produção do arroz inundado em decorrência da calagem foram relatados por Vahl, Gomes e Botelho (1978).

O comportamento do P em solos inundados é complexo, pois, nessas condições, o P se encontra envolvido indiretamente nas reações de óxido-redução de vários elementos, tornando difícil a avaliação de sua disponibilidade. Trabalhos recentes têm demonstrado dificuldades para recomendação de adubação fosfatada para o arroz inundado (Guilherme, 1990 e Mello, 1991). Por essa razão, necessita-se avaliar de modo eficiente o P existente no solo sob condições de inundação que está disponível às plantas, bem como determinar faixas de concentração adequadas desse nutriente para o desenvolvimento do arroz nesse sistema, uma vez que a inundação traz como conseqüências uma série de alterações físico-químicas no solo que afetam a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes.

Assim, o objetivo desse trabalho foi verificar o efeito residual da adubação fosfatada e da calagem realizada no cultivo do feijoeiro para o cultivo subsequente do arroz inundado e estimar os níveis críticos de P em plantas de arroz.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, em vasos plásticos com capacidade para três dm³. Cultivaram-se plantas de arroz (*Oriza sativa* L. cv. Jequitibá) sob inundação no período de outubro de 1998 a fevereiro de 1999, em amostras (0-20cm) de quatro solos de várzea previamente cultivados em vasos com feijoeiro, os quais receberam dois níveis de correção de acidez e cinco doses de fósforo.

Os atributos químicos, físicos e mineralógicos das amostras naturais desses solos encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1. Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos naturais usados no experimento

Solo	Químicos												
	pH ¹	P ¹	K ¹	Ca ¹	Mg ¹	Al ¹	H+Al ¹	t ¹	T ¹	m ¹	V ¹	CMAP ²	PR ²
		—mg/dm ³ —		—cmol/dm ³ —						—%—		mg/kg	mg/L
GP	4,5	3	36	0,6	0,2	1,1	6,3	2,0	7,2	55	12	648	28
A	4,7	3	103	2,7	1,1	0,2	4,5	4,3	8,6	5	47	689	27
GH	4,7	8	51	0,7	0,2	1,6	13,7	2,6	14,7	61	7	2404	1,77
O	4,6	6	76	1,6	1,2	0,9	9,8	3,9	12,8	23	23	1051	16

	Físicos							
	Areia grossa ¹	Areia fina ¹	Silte ¹	Argila ¹	Matéria orgânica ¹	Ds ¹	Dp ¹	Superfície específica ¹
	g/kg					g/cm ³		— m ² /g —
GP	30	611	179	180	31	1,0	2,7	121
A	0	179	471	350	31	0,8	2,8	137
GH	10	230	390	370	230	0,4	1,8	335
O	0	120	570	310	44	0,6	2,1	181

	Mineralógicos									
	SiO ₂ ³	Al ₂ O ₃ ³	Fe ₂ O ₃ ³	TiO ₂ ³	P ₂ O ₅ ³	Fe _d ⁴	Fe _o ⁴	Fe _o /Fe _d ⁵	Gb ⁴	Ct ⁴
	g/kg									
GP	84,2	112,2	13,0	6,2	0,1	1,8	0,6	0,33	19	65
A	209,3	221,1	74,5	9,3	0,5	12,3	0,5	0,04	49	143
GH	126,1	175,5	13,3	5,5	1,5	2,3	0,6	0,26	53	48
O	243,4	247,1	42,8	7,3	0,5	5,3	0,5	0,09	57	121

¹ pH = pH em água; P = fósforo pelo Mehlich 1; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; t = capacidade de troca de cátions a pH natural; T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; m = saturação por Al e V = saturação por bases; areia grossa; areia fina; silte; argila; mat. orgânica; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; superfície específica; (EMBRAPA, 1997);

² PR = P remanescente e CMAP = capacidade máxima de adsorção de P (Alvarez V. e Fonseca, 1990);

³ Óxidos do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997);

⁴ Fe_d = ferro ditionito; Fe_o = ferro oxalato; Ct = caulinita; Gb = gibsitita (Mehra e Jackson, 1960)

⁵ Fe_o/Fe_d = atividade dos óxidos de ferro (Kämpf, 1988)

O experimento com feijoeiro foi conduzido em casa de vegetação, em vasos de três dm^3 , onde se cultivaram três plantas, sendo uma colhida no florescimento e as duas restantes no final do ciclo. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em fatorial $4 \times 5 \times 2$ com quatro repetições, sendo os fatores quatro solos - Aluvial (A), Glei Pouco Húmico (GP), Glei Húmico (GH) e Orgânico (O), esse último artificialmente drenado e apresentando menor teor de matéria orgânica; cinco doses de P - 75, 150, 300, 500 e 800 mg dm^{-3} de P e dois níveis de correção de acidez dos solos: ausência e presença de calagem nas doses de 4,6; 13,4; 6,4 e $4,6 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente, de um calcário dolomítico calcinado com PRNT=100%, CaO=35% e MgO=14%, cujas doses foram estabelecidas para cada solo por Andrade (1997).

Após a colheita do feijoeiro na época da maturação dos grãos, os solos dos vasos foram secos, destorroados e peneirados em malha de 5mm para a retirada das raízes. Nessa época foram tomadas subamostras dos solos para análises químicas, permanecendo o restante nos vasos, onde foi conduzido o presente experimento com arroz inundado.

O delineamento utilizado no experimento do arroz foi o mesmo do descrito pelo feijoeiro, com três repetições. Antes da inundação e plantio do arroz, os solos dos vasos receberam uma adubação básica constando de: 70mg de N; 100mg de K; 50mg de S; 0,5mg de B; 0,75mg de Cu e 2,5 mg de Zn dm^{-3} de solo na forma de reagentes p.a.: KNO_3 ; NH_4NO_3 ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; H_3BO_3 ; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Os solos dos vasos permaneceram sob inundação por 60 dias, quando foram amostrados para as determinações de fósforo por Mehlich 1 (Embrapa, 1997) e Resina (Raij et al., 1987) (Tabela 2).

TABELA 2. Teores disponíveis de P nos solos pelos extratores Mehlich 1 e Resina, após 60 dias de inundação

Solo	Doses de P (mg dm ⁻³)				
	75	150	300	500	800
mg dm ⁻³					
com calagem – Mehlich 1					
GH	41	50	71	151	196
GP	20	57	117	174	269
O	30	46	84	132	187
A	11	13	36	71	125
sem calagem – Mehlich 1					
GH	33	50	112	138	252
GP	41	107	122	168	279
O	19	33	62	98	172
A	13	17	41	58	102
com calagem – Resina					
GH	45	55	67	68	153
GP	81	90	152	187	338
O	31	44	42	104	152
A	27	55	82	149	262
sem calagem – Resina					
GH	45	60	91	130	171
GP	64	112	130	162	147
O	26	39	71	110	158
A	21	25	52	97	120

O pH em água foi obtido antes da inundação, conforme Vettori (1969) com modificações da EMBRAPA (1997) e, após o período de inundação, foi determinado na própria água de inundação do solo em cada vaso, com o uso de um peagâmetro portátil. Para tal, abriu-se um orifício no solo dos vasos, onde foi introduzido o eletrodo e medido o pH (Tabela 3).

TABELA 3. Valores de pH em água dos solos antes e após 60 dias de inundação, antes do cultivo do arroz

Solo	Doses de P (mg dm ⁻³)									
	75		150		300		500		800	
	AI	DI	AI	DI	AI	DI	AI	DI	AI	DI
com calagem										
GH	4,8	5,8	5,0	5,6	5,0	5,7	5,3	5,9	5,3	5,8
GP	6,6	7,3	6,8	7,3	6,8	7,2	6,7	7,2	6,6	7,0
O	5,2	6,1	5,2	6,5	5,2	6,3	5,2	6,3	5,3	6,5
A	5,6	7,0	5,8	7,2	5,6	7,1	5,6	7,0	5,7	7,0
sem calagem										
GH	3,9	5,6	4,0	5,5	4,0	5,5	4,1	5,6	4,3	5,4
GP	4,5	6,0	4,6	6,1	4,6	6,0	4,7	6,1	4,9	6,1
O	4,5	6,0	4,6	6,1	4,7	6,1	5,1	6,1	5,0	6,2
A	4,7	7,0	4,8	7,0	4,9	7,0	5,1	6,9	5,1	6,9

AI: Antes da inundação, DI: Depois da inundação

Após o período de inundação foram transplantadas quatro plântulas de arroz por vaso previamente germinadas em vermiculita, conduzindo-se duas plantas depois do desbaste, até a maturação dos grãos. Durante o período experimental, o arroz recebeu adubações nitrogenada e potássica em cobertura, na medida da necessidade. As plantas dos tratamentos que apresentaram um crescimento normal receberam 580 mg dm⁻³ de N e 500 mg dm⁻³ de K, parcelados em 8 aplicações. Os demais tratamentos receberam doses proporcionalmente menores, de acordo com o crescimento das plantas.

A água desmineralizada foi usada no período prévio de inundação (60 dias) e durante o cultivo do arroz inundado, mantendo-se uma lâmina de água de três cm sobre a superfície do solo.

Na época do florescimento, foram coletadas folhas bandeira das plantas de arroz, nas quais foram analisados os teores de P (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997), com o objetivo de se estimar os níveis críticos foliares do nutriente.

Nas plantas colhidas no final do ciclo foram determinados o número de perfilhos e a produção de grãos. Os grãos foram colhidos no momento em que a porcentagem de grãos maduros foi máxima e a de grãos verdes mínima, e secos em estufa de circulação forçada de ar a temperatura de 40 - 45°C, até atingir uma umidade de 13% (Fornasieri Filho e Fornasieri, 1993). Logo após, foram limpos, descascados e pesados, obtendo-se assim, a produção de grãos pelas plantas.

As variáveis estudadas foram submetidas a análise de variância e estudos de regressão, cujas equações foram ajustadas às médias de produção de grãos em função das doses de P aplicadas. A partir das equações obtidas, estimaram-se as doses de P necessária para atingir a produção máxima e 90% da produção máxima de grãos para cada solo e nível de calagem. Substituindo-se as doses para 90% da máxima produção de grãos nas equações que relacionam os teores foliares de P como variáveis dependentes das doses de P aplicadas, estimaram-se os níveis críticos de P na folha bandeira das plantas de arroz para cada solo e nível de calagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de grãos

A análise de variância para produção de grãos mostrou que os solos, as doses de P e a calagem influenciaram significativamente a produção de grãos do arroz, sendo a interação calagem x solo x dose de P significativa ($P < 0,01$) para essa variável (Tabela 1A). Equações de regressão foram ajustadas para produção de grãos como variável dependente das doses de P aplicadas, para cada solo e nível de calagem (Figura 1).

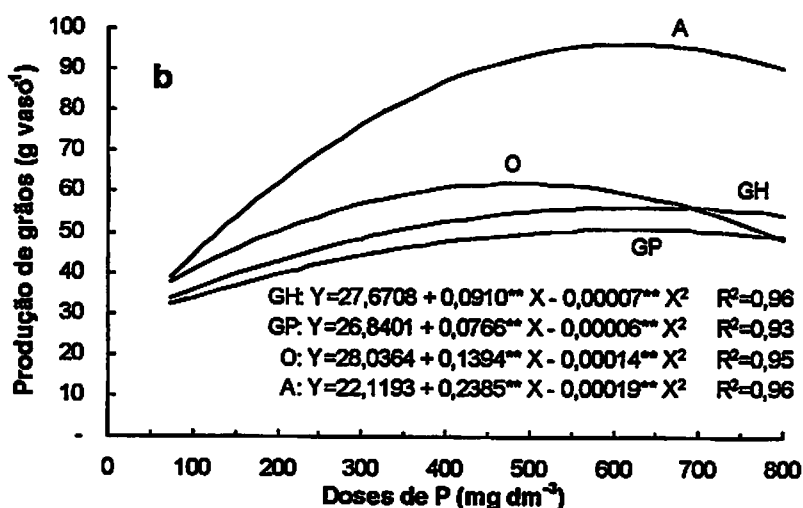
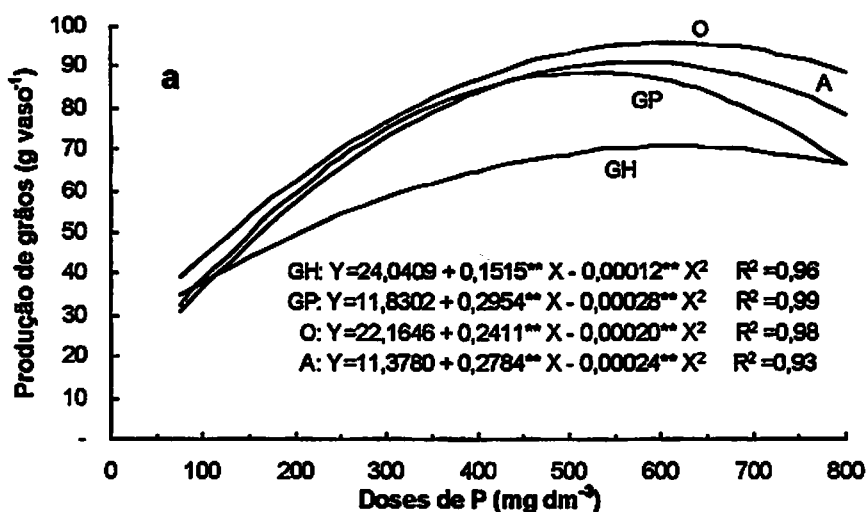


FIGURA 1. Produção de grãos pelo arroz inundado em função das doses de P aplicadas aos solos de várzea com (a) e sem (b) calagem (**, significativo a 1% pelo teste t).

As equações quadráticas foram as que melhor se ajustaram à produção de grãos tanto para os solos com calagem quanto para os sem calagem (Figura 1). O modelo explica aumentos na produção de grãos com a aplicação das doses crescentes de P e, após atingir um ponto máximo, decréscimos na produção com as doses mais altas, sugerindo um excesso do nutriente ou, mais provavelmente, um desequilíbrio nutricional.

Os ajustes quadráticos (Figura 1) também evidenciaram um efeito residual positivo da doses de P aplicadas no feijoeiro para o arroz inundado em cultivo subsequente.

Após a inundação do solo, o fósforo residual tornou-se mais disponível devido sua maior solubilização (Ponnamperuma, 1972) e difusão (Turner e Gilliam, 1976) sob essas condições, o que favoreceu o sucesso da rotação feijão de sequeiro - arroz inundado. Resultados benéficos do fósforo residual para o arroz inundado também foram encontrados em outros trabalhos (Verma, Shrama e Singh, 1981; Medhi, Datta e De-Datta, 1997).

A partir das equações da Figura 1, estimaram-se as produções de grãos e as doses de P correspondentes à produção máxima e 90% da máxima (Tabela 4). A máxima eficiência econômica foi estimada no índice de 90% da produção máxima (Alvarez V. et al., 1988).

As doses de P responsáveis por 90% da máxima produção de grãos de arroz corresponderam a 54-66% das doses para a máxima produção (Tabela 4), ou seja, a redução de apenas 10% na produção de grãos correspondeu a uma grande economia na dose do nutriente.

Quando se comparam as produções de grãos obtidas sem aplicação de calcário com aquelas obtidas com a aplicação do corretivo, observa-se que as doses de P correspondentes a 90% da máxima produção de grãos foram praticamente semelhantes para cada solo, exceto no O (Tabela 4). No entanto, a

produção de grãos foi significativamente superior na presença de calagem, exceto para o solo A, onde observou-se o inverso.

TABELA 4. Produção estimada de grãos de arroz correspondente à produção máxima e 90% da máxima e as doses de P estimadas para promover essas produções

Solo	Produção de grãos (g vaso ⁻¹)		Dose de P (mg dm ⁻³)	
	90%	Máxima	90%	Máxima
Com calagem				
GH	63,3	70,4	373	612
GP	79,6	88,5	342	519
O	86,0	95,5	390	609
A	81,8	90,9	378	571
Sem calagem				
GH	50,8	56,4	361	634
GP	45,6	50,7	336	623
O	55,9	62,1	281	489
A	86,6	96,3	398	622

O aumento na produção de grãos encontrado nos solos GH e GP com a presença de calagem pode ser explicado pela elevação dos teores de Ca e Mg inicialmente baixos em condições naturais desses solos (Tabela 1). Segundo Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka (1987), em arroz inundado, onde ocorre uma elevação natural do pH pela inundação com conseqüente inibição da ação do alumínio, podem ocorrer respostas à calagem, principalmente em solos ácidos com baixos teores de Ca e Mg. Nesse contexto, deve-se considerar não só a importância do cálcio na planta e no solo cultivado com arroz irrigado (Patella, 1976), mas também o papel do magnésio na absorção de P pela planta de arroz (Fageria, 1984).

Porém, segundo Vahl, Gomes e Botelho (1978), respostas positivas no rendimento do arroz em decorrência da elevação dos níveis de Ca e Mg através de calagem são menos prováveis de ocorrer em solos com níveis baixos de P. Observa-se na Tabela 2 que os teores de P para o solo A são os mais baixos,

tanto pelo extrator Mehlich 1 quanto pela resina. Portanto, a falta de resposta à calagem nesse solo é provavelmente reflexo de seus baixos teores de P e não de um insuficiente aumento de Ca e Mg após a incubação com calcário, uma vez que o solo A é naturalmente mais rico nesses nutrientes em relação aos demais (Tabela 1). Talvez seja por isso também que a maior produção de grãos na ausência de calagem tenha sido encontrada no solo A, onde o Ca e o Mg não foram limitantes à produção.

Observa-se ainda no solo GP, o qual possuiu maiores teores de P por Mehlich 1 e resina (Tabela 1), maior resposta do arroz com a elevação dos níveis de Ca e Mg em decorrência da calagem (Figura 1, Tabela 4).

No solo O verificou-se também alta resposta do arroz à calagem. Esse solo naturalmente possui baixos teores de P-remanescente (PR) e alta capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) (Tabela 1), valores que, segundo Muniz et al. (1985), refletem alto poder tampão de P no solo. O solo O possui ainda um baixo índice Fe_o/Fe_d (Tabela 1), o que lhe confere uma baixa atividade dos óxidos de ferro, ou seja, menor adsorção de fosfatos por esses óxidos (Kämpf, 1988). Segundo Mello (1991), em solos ácidos com alta capacidade tampão de P e baixa atividade de óxidos de ferro sob condição de inundação podem-se esperar respostas do arroz à calagem. O autor explica que, nessas condições, a alta capacidade tampão de P do solo inundado acaba influenciando mais a disponibilidade de P para as plantas do que a atividade de seus óxidos, que pode ser diminuída com a calagem. Portanto, a alta resposta do arroz à calagem encontrada nesse solo pode não ser somente devido à elevação dos teores de Ca e Mg, mas também devido ao aumento da capacidade do solo em fornecer P para o arroz quando corrigido.

No solo GH, constatou-se um baixo potencial produtivo de grãos, tanto na ausência quanto na presença de calagem. Esse solo possui um alto teor de matéria orgânica e alta relação Fe_o/Fe_d (Tabela 1). Segundo Sah e Mikkelsen

(1986), a decomposição anaeróbica da matéria orgânica intensifica a transformação do ferro cristalino em ferro amorfo (Fe_0). Vários autores têm demonstrado que os óxidos de ferro amorfos, extraíveis com oxalato (Fe_0), são os principais responsáveis pela sorção de P em solos e sedimentos sujeitos à inundações (Shukla et al., 1971; Kuo e Lotse, 1974; Khalid, Patrick Jr. e De Laune, 1977; Willett, 1979; Kuo e Mikkelsen, 1979; Sah e Mikkelsen, 1986). Assim, no solo GH, a alta atividade do óxidos de ferro mal cristalizados aliada a um alto poder tampão de P dado pelos valores de P-remanescente (PR) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) (Tabela 1) sugerem uma menor quantidade de P na solução do solo disponível para as plantas, resultando em uma baixa produção de grãos.

3.2 Perfilhamento

A análise de variância para número de perfilhos por planta mostrou que os solos, as doses de P e a calagem influenciaram significativamente o perfilhamento do arroz, sendo a interação calagem x solo x dose de P significativa ($P < 0,01$) para essa variável. O número de perfilhos por planta, por estar diretamente relacionado com produção, tal como esta, apresentou ajuste quadrático das regressões (Figura 2).

Sabe-se que o P, como no caso do N, aumenta o número de perfilhos das gramíneas e, com isso, o número de panículas, desempenhando um importante papel na produção de grãos (Barbosa Filho, 1987). Apesar do perfilhamento ser uma característica controlada geneticamente na planta, houve resposta significativa dessa variável às doses de P dentro dos dois níveis de correção dos solos estudados.

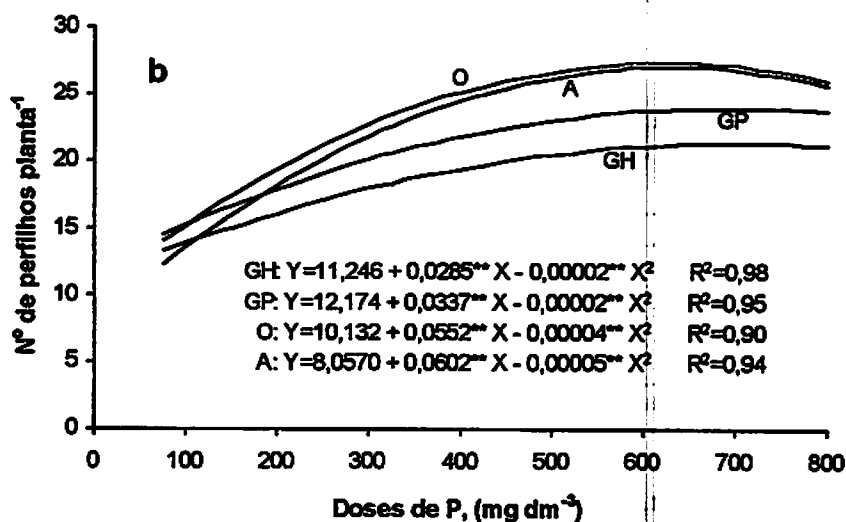
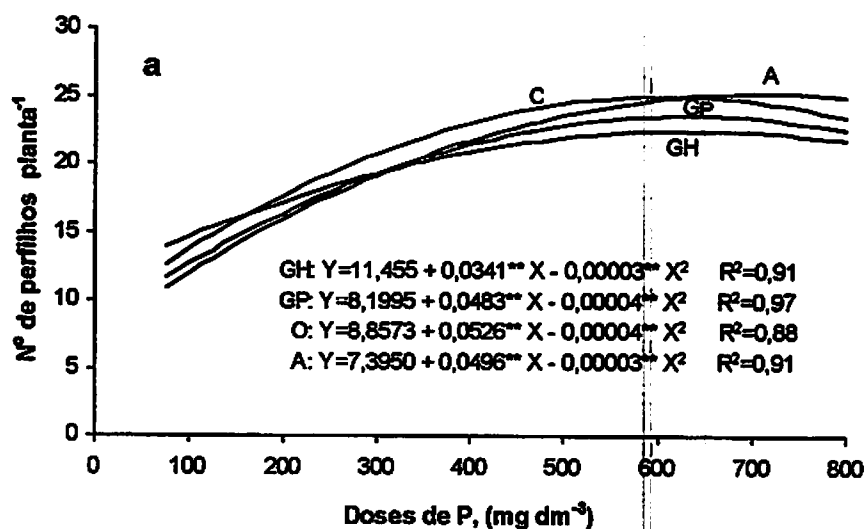


FIGURA 2. Número de perfilhos por planta de arroz em função das doses de P aplicadas aos solos de várzea com (a) e sem (b) calagem (**significativo a 1% pelo teste t).

As doses de P estimadas correspondentes ao máximo perfilhamento da plantas para os solos GH, GP, O e A com calagem foram de 568, 604, 657 e 827 mg dm⁻³ de P e de 712, 842, 690 e 602 mg dm⁻³ de P para os mesmo solos sem calagem, respectivamente.

Para os solos A sem calagem e O com calagem, em que verificaram-se as maiores produções de grãos, as doses de P correspondentes ao máximo perfilhamento foram muito semelhantes às encontradas para a máxima produção de grãos (Tabela 4). Essa observação evidencia uma relação mais estreita entre perfilhamento e produção de grãos para estes solos e seus respectivos níveis de calagem, o que pode ser confirmado pelos coeficientes de correlação mais altos e significativos obtidos entre produção de grãos e número de perfilhos por planta (Tabela 5) nessas situações. No solo GP sem calagem, onde ocorreu menor produção de grãos, a correlação dessa variável com o perfilhamento não foi significativa.

TABELA 5. Coeficientes de correlação simples entre número de perfilhos/planta e produção de grãos/planta

Solo	Com calagem	Sem calagem
GH	0,85*	0,92*
GP	0,88*	0,65ns
O	0,96**	0,84*
A	0,91*	0,95**

*,** significativo a 5 e a 1%, respectivamente

Pode-se dizer, então, que quanto maior foi a resposta da planta em produção de grãos à adubação fosfatada, maior foi a relação entre perfilhamento e produção de grãos. Segundo Fornasieri Filho e Fornasieri (1993), a iniciação do primórdio dos perfilhos do arroz independe do ambiente, mas a sua emergência e desenvolvimento são fortemente influenciados pela disponibilidade de água, nitrogênio e fósforo. Assim, supõe-se que nos solos A

sem calagem e O com calagem houve um maior equilíbrio entre esses fatores, o que, de acordo com os autores, proporcionou um ótimo perfilhamento, explorando melhor o potencial produtivo da cultivar.

3.3 Nível crítico de P na planta

Para as concentrações de P no tecido foliar da folha bandeira das plantas de arroz na época do florescimento, a interação solo x dose x calagem foi significativa ($P < 0,01$) (Tabela 1 B). Equações de regressão foram ajustadas para as concentrações de P como variáveis dependentes das doses de P aplicadas. Substituindo nessas equações as doses de P correspondentes a 90% da máxima produção de grãos, estimou-se o nível crítico de P nas folhas bandeira de arroz na época do florescimento (Tabela 6).

TABELA 6. Equações de regressão ajustadas para os teores foliares de P na folha bandeira ($Y = g\ kg^{-1}$) como variável dependente das doses de P aplicadas ($X = mg\ dm^{-3}$) e níveis críticos foliares de P para 90% da máxima produção de grãos

Solo	Equação	R ²	Níveis críticos ($g\ kg^{-1}$)
Com calagem			
GH	$Y = 1,5416 + 0,0012 * X$	0,91	1,54
GP	$Y = 1,3844 + 0,0029 ** X - 0,000002 ** X^2$	0,95	2,14
O	$Y = 2,1653 + 0,0015 ** X$	0,94	2,70
A	$Y = 0,8558 + 0,00033 ** X$	0,88	0,98
Sem calagem			
GH	$Y = 0,8282 + 0,00045 * X$	0,87	0,98
GP	$Y = 0,859 + 0,001 * X - 0,000001 ** X^2$	0,91	1,09
O	$Y = 0,0391 + 0,0087 * X - 0,000007 ** X^2$	0,93	1,93
A	$Y = 2,2003 + 0,00069 * X$	0,80	2,47

*, ** significativo a 1 e 5%, respectivamente, pelo teste t

Verifica-se que os níveis críticos de P na folha bandeira variaram de 0,98 a 2,7 g kg⁻¹ entre os solos estudados, sendo esses valores muito próximos aos encontrados por Mello (1991), Moura Filho (1990) e Hossner, Freeouf e Folsom (1973). Essas variações mostram-se dependentes da relação entre níveis de calagem e os solos estudados que influenciaram o crescimento, a produção de grãos e a utilização do nutriente pela planta, conferindo diferentes valores de níveis críticos no tecido da folha bandeira do arroz. Essa afirmativa pode ser confirmada pelo fato de os solos A e GP com calagem terem apresentado produção de grãos similar, com níveis críticos bastante distintos (Tabelas 4 e 6).

De modo geral, a concentração crítica de P foliar foi maior dentro do nível de calagem no qual houve maior produção de grãos para cada solo (Tabelas 4 e 6). Nos solos GH, O e GP, onde ocorreram respostas do arroz à calagem, os acréscimos nos teores de P para cada unidade de P aplicada, mostrados pelos coeficientes angulares das equações (Tabela 5), foram maiores quando esses solos receberam aplicação de calcário. Provavelmente, a elevação dos níveis de Ca e Mg favoreceram a absorção de P pela planta (Patella, 1976; Fageria, 1984). Por outro lado, no solo A não observou-se esse fenômeno, provavelmente devido aos níveis baixos de P nele verificados (Vahl, Gomes e Botelho, 1978) (Tabela 2), como já discutido anteriormente.

Segundo Novais e Smith (1999), a competição entre planta e solo pelo P aplicado faz com que a planta se ajuste para utilizar o teor de P que lhe é disponível. Assim, quando o P é o único fator limitante à produção, além das variações entre espécies e cultivares, idade da planta ou órgão analisado, forma do nutriente, as características do solo que refletem o fator capacidade de P também devem ser consideradas na interpretação dos níveis críticos de P em plantas (Muniz et al., 1985).

Alguns trabalhos têm demonstrado que existe uma certa dependência dos níveis críticos de P na planta em relação a capacidade tampão de fosfatos

dos solos (Freire, Novais e Neves, 1985; Muniz et al., 1985; Fabres et al., 1987; Mello et al., 1993 e Fonseca et al., 1997). Segundo Mello et al. (1993), essa dependência varia em função da calagem. Os autores verificaram que os coeficientes de correlação entre as concentrações críticas de P nos tecidos de plantas de arroz e as características do solo relacionadas à capacidade tampão de fosfatos foram maiores quando considerados apenas os tratamentos que receberam calcário. No presente trabalho seguiu-se a mesma tendência, porém os coeficientes de correlação entre níveis críticos de P na folha bandeira e P-remanescente (Tabela 1) foram baixos e não significativos dentro dos dois níveis de calagem ($r = -0,48$ ns com calagem, $r = 0,17$ ns sem calagem).

Essa falta de correlação, também verificada por Moura Filho (1990), deve-se provavelmente a instabilidade da capacidade tampão de fosfatos em solos inundados, ressaltando-se que o P-remanescente utilizado no presente trabalho foi obtido em amostras oxidadas dos solos em condições naturais. Esses valores nos foram utilizados nos cálculos dos coeficientes de correlação considerando-se que, no trabalho de Mello et al. (1993), em nove solos de várzeas não verificaram-se diferenças nos teores de P-remanescente com os níveis de calagem.

De acordo com Holford e Patrick Jr. (1979), Roy e De Datta (1985) e Mello (1991), os fatores que controlam a disponibilidade de fósforo nos solos podem sofrer modificações acentuadas durante o período de inundação do solo e que tais alterações devem-se principalmente à redução dos óxidos de ferro. As variações no teor de matéria orgânica e atividade dos óxidos de ferro (Fe_o/Fe_d) verificadas entre os solos estudados (Tabela 1), segundo Léon e Arrogocés (1981), refletem um distinto potencial de redução quando os solos são inundados, o que altera de modo diferenciado o fator capacidade tampão de fosfato de cada solo.

4 CONCLUSÕES

De modo geral, o arroz respondeu em produção de grãos às doses de P e calagem aplicados nos solos antes do cultivo do feijoeiro, conferindo-lhes um efeito residual positivo, sendo que somente no solo A não ocorreu resposta do arroz à calagem.

Os níveis críticos de P foliar para 90% da produção máxima variaram entre os solos de várzea estudados e corresponderam a 0,98; 1,09; 1,93 e 2,47 g kg⁻¹ na ausência de calagem para os solos GH, GP, O e A e a 1,54; 2,14; 2,70 e 0,98 g kg⁻¹ na presença de calagem para os mesmos solos, respectivamente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C.A. de B. Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos de várzea do sul de Minas Gerais. Lavras: UFLA, 1997. 107p. (Tese - Doutorado em Fitotecnia).
- ALVAREZ V. V. H.; FONSECA, D. B. da. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.49-55, jan./abr.1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.de; BRAGA, J.M.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; RIBEIRO, A.C.; DEFELIPO, B.V. Avaliação da fertilidade do solo: metodologia. In: SIMPÓSIO DA PESQUISA NA UFV, 1., 1988. Viçosa. Resumos... Viçosa: UFV, 1988. p. 68-69.
- BARBOSA FILHO, M.P. Nutrição e adubação do arroz (sequeiro e inundado). Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1987. 129p. (Boletim técnico 9).
- BARBOSA FILHO, M.; 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, v.11, n.2, p.147-155, maio/ago. 1987.

- DHILLON, K.S.; BAHL, G.S. Response of fertilizer phosphorous in rice-lentil cropping sequence. *Annals of biology, Ludhiana*, v.8, n.1, p.33-38, 1992.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997. 212p.
- FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; CORDEIRO, A.T. Níveis críticos de diferentes frações de P em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.11, n.1, p.51-57, jan./abr.1987.
- FAGERIA, N.K. *Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz*. Rio de Janeiro: Campus/EMBRAPA-CNPAF, 1984. 341p.
- FAGERIA, N.K.; SANTOS, A.; ZIMMERMANN, F.J.P. Efeito residual da adubação e de níveis de adubação aplicados no sulco de plantio sobre a produção de arroz irrigado em solo de várzea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1999, Brasília. *Anais...1999*. (CD-ROM).
- FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P.; LOPES, A.M. Resposta do arroz irrigado à aplicação de fósforo, zinco e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.1, p. 72-76, 1977.
- FONSECA, D.M.da; GOMIDE, J.A.; ALVAREZ V.V.H.; NOVAIS, R.F.de. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: I. casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, n.1, p.27-34, jan./mar. 1997.
- FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J.L. *Manual da cultura do arroz*. Jaboticabal: FUNEP, 1993. 221 p.
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de fósforo para o crescimento de estilosantes como função do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Ceres*, Viçosa, v.32, n.184, p.488-499, nov./dez. 1985.
- GUILHERME, L.R.G. *Calagem e inundação em solos de várzea cultivados com arroz: alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxôfre*. Lavras: ESAL, 1990. 113p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

- HOLFORD, I. C. R.; PATRICK JR., W. H.** Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, n.2, p.292-297, Mar./Apr. 1979.
- HOSSNER, L.R.; FREEOUF, J.A.; FOLSOM, B. L.** Solution phosphorous concentration and growth of rice (*Oryza sativa* L.) in flooded soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.37, n.3, p.405-408, May/June. 1973.
- KAMPF, N.** O ferro no solo. In: **REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS**, 1., 1988, Goiânia. Anais...Goiânia: EMBRAPA – CNPAF, 1988. p.35-71. (EMBRAPA – CNPAF. Documentos, 22)
- KHALID, R.A.; PATRICK JR., W.H.; DE LAUNE, R.D.** Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.41, n.2, p.305-310, Mar./Apr.1977.
- KUO, S.; LOTSE, E.G.** Kinetics of phosphate adsorption and desorption by lake sediments. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v.38, n.1, p.50-54, Jan./Feb. 1974.
- KUO, S.; MIKKELSEN, D.S.** Distribution of iron and phosphorus in flooded and unflooded soil profiles and their relation to phosphorus adsorption. **Soil Science**. v.127, n.1, p.18-25, Jan.1979.
- LEITE, N.; GARGANTINI, H.; HUNGRIA, L.S.; IGUE, T.** Efeitos de nitrogênio, fósforo, cálcio e micronutrientes em cultura de arroz irrigado no vale do Paraíba. **Bragantia**, Campinas, v.29, n.25, p.273-285, ago.1970.
- LÉON, L.A.; ARREGOCÉS, O.** Química de los suelos inundados - guia de estudio. Cali, Colombia: CIAT, 1981. 35p.
- MACHADO, M.O.; DIAS, A. D.; GOMES, A da S.; PAULETTO, E. A.** Efeito de P e Ca durante 5 cultivos de arroz irrigado. In: **REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO**, 14., 1985, Pelotas. Anais...
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A.** Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 210p.

- MASTHAN, S. C.; MOHAMMAD, S.; REDDY, S.N. Influence of phosphorous application rates on nutrients uptake by crops and balance of soil phosphorous in rice-groundnut-green-gram intensive cropping system. *Crop Research Hisar, Rajendranagar*, v.16, n.1, p.10-16, July 1998.
- MEDHI, D.N.; DATTA, S.K., de; DE-DATTA, S.K. Residual effect of fertilizer phosphorous in lowland rice. *Nutrient-Cycling-in-Agroecosystems*, Manila, Philippines, v.46, n.3, p.189-193, 1997.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, N.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, Clarkson, v.3, p.317-327, 1960.
- MELLO, J.W.V. Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados. Viçosa: UFV, 1991. 212p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- MELLO, J.W.V. de; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. Concentrações críticas de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n.2, p.211-216, maio/ago. 1993.
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzea. Viçosa: UFV, 1990. 76p. (Dissertação - Mestrado em Solos).
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, n.3, p.237-243, set./dez. 1985.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399p.
- PATELLA, J.F. Arroz em solo inundado: uso adequado de fertilizantes. São Paulo: Nobel, 1976. 76 p.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, v.24, p.28-96, 1972.

- RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170p.
- RAMAMURTY, V.; SHIVASHANKAR, K. Residual effect of organica matter and phosphorous on growth, yield and quality of maize (*zea mays*). *Indian Journal of Agronomy*, Bangalore, v.41, n.2, p.247-251, June 1996.
- RAO, P.G.; RAGHAVULU, P.; REDDY, S.R.; REDDY, G.V.; RAO, K.R. Residual effects of phosphorous sources and levels in cereal-legumes sequence. *Indian Journal of Agronomy*, Bapatla, v.36, n.2, p.169-172, June 1991.
- ROY, A.C.; DE DATTA, S.K. Phosphorus sorption isotherms evaluating phosphorous requirements of wetland rice soils. *Plant and Soil*, The Hague, v.86, p.185-196, 1985.
- SAH, R. N.; MIKKELSEN, D.S. Effects of anaerobic decomposition of organic matter on sorption and transformations of phosphate in drained soils: 2. Effects on amorphos iron content and phosphate transformation. *Soil Science*, v.142, n.6, p.346-351, Dec.1986.
- SHUKLA, S.S.; SYERS, J.K. WILLIAMS, J.D.H.; ARMONSTRONG, D.E.; HARRIS, R.E. Sorption of inorganic phosphate by lake sediments. *Soil Science of American Proceedings*, Madison, v.35, n.2, p.244-249, mar./apr. 1971.
- TURNER, F.T.; GILLIAN, J.W. Increased P diffusion as na explanation of increased P availability in flooded rice soils. *Plant and Soil*, The Hague, v.45 p. 365-377, 1976.
- VAHL, L.C.; GOMES, A.S.; BOTELHO, R.C. Influência do Ca, Mg, Zn e P sobre o rendimento e outras características da cultura do arroz irrigado. *Agros, Pelotas*, v.13, p.65-75, 1978.
- VERMA, U.K.; SHRAMA, I.P.; SINGH, R.S. Effect of applied and residual phosphorous on yield of wetland rice under acid soil condittions. *International Rice Research Newsletter (IRRI)*, Ranchi, v.6, n.6, p.23, Dec.1981.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).

WILLET, I.R. The effects of flooding for rice culture on soil chemical properties and subsequent maize growth. **Plant and Soil**, The Hague, v.52, n.3, p.373-383, Aug. 1979.

CAPÍTULO 3

NÍVEIS CRÍTICOS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS COM ARROZ INUNDADO

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Níveis críticos e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz inundado. Lavras: UFLA, 1999. 74 p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia)

Objetivou-se com esse trabalho estimar níveis os críticos de P pelos extratores Mehlich 1 e resina em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação relacionando-os com a capacidade tampão de fosfatos, comparar a eficiência desses extratores na avaliação do P disponível e ainda identificar as frações de P que estão contribuindo para a nutrição fosfatada do arroz, relacionando-as com o P recuperado pelos extratores e pelas plantas. Foram utilizados quatro solos de várzea pré-cultivados com feijoeiro: Gleí Pouco Húmico (GP), Aluvial (A), Gleí Húmico (GH) e Orgânico (O), este último artificialmente drenado. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em fatorial $4 \times 5 \times 2$ com três repetições, sendo quatro solos, cinco doses de P (75, 150, 300, 500 e 800 mg dm^{-3}) e dois níveis de calagem: ausência e presença. Os solos receberam uma adubação básica com macro e micronutrientes e foram inundados por 60 dias. Posteriormente, foram amostrados e avaliados para P por Mehlich 1 e resina e fracionamento de P. Cada parcela constituiu de um vaso de três dm^3 em que cultivaram-se duas plantas, nas quais foram avaliados a produção de grãos, as concentrações de P e o peso da matéria seca da parte aérea no final do ciclo. As formas de P pouco lábeis dos solos também contribuíram para a nutrição fosfatada do arroz. Os dois extratores testados demonstraram eficiência na avaliação do P disponível para o arroz cultivado sob inundação nos solos de várzea estudados. Os valores de níveis críticos estimados pelo Mehlich 1 foram de 104, 120, 101 e 53 na presença de calagem e de 116, 135, 59, e 50 mg dm^{-3} de P na ausência de calagem para os solos GH, GP, O e A, respectivamente. Quando estimados pela resina foram de 79, 162, 79 e 119 mg dm^{-3} com calagem e de 99, 125, 65 e 68 mg dm^{-3} de P para os mesmos solos sem calagem, respectivamente. Os níveis críticos de P no solo mostraram-se mais dependentes da atividade dos óxidos de ferro dos solos de várzea do que do fator capacidade tampão de fosfatos.

ABSTRACT

MARIANO, Isabela Orlando dos Santos. Critical levels and availability of phosphorus in rice waterlogging soils. Lavras: UFLA, 1999. 74p. (Dissertation – Master Program in Agronomy)

This work aimed to estimate the critical P levels for the extractors Mehlich 1 and resin in soils with waterlogging rice cultivars establishing a relationship between them and phosphate's buffering capacity in soils, so to compare the performance of the extractors as for the evaluation of the availability of P and to identify the fractions of P that contribute to P nutrition on rice, relating them to the P recovered by extractors and the plants. The soils types studied which comprise the Low Humic Gley (GP), Aluvial (A), Humic Gley (GH) and Bog Soil (O) classes were previously used for bean plant cultivation. A completely randomized type of experimental design was used, in a factorial scheme, four types of soil having been used, five P doses (75, 150, 300, 500 and 800 mg/kg) with liming and otherwise, with three replications. The soil portions were thoroughly mixed with macro and micronutrients, being later submitted to 60 days of waterlogging. Afterwards, the soil samples were submitted to extraction of P by resin and Mehlich 1, and fractionation. Two rice plants were cultivated in 3 (three) dm^3 pots. Grain yield, top dry matter weight and the P rates in top plants at the end of the cycle were determined. The moderately labile P of the soil samples also contributed to feeding rice with P. The two tested extractors showed to be efficient as for the evaluation of available P for the rice cultivated in lowland waterlogged soils. Mehlich1 estimative for critical P levels ranged from 104 to 120, 101 and 53 in presence of liming and from 116 to 135, 59, e 50 mg/dm^3 in the absence of liming for GH, GP, O and A, respectively. When estimated by resin, variation ranged from 99 to 125, 65 and 68 mg/dm^3 in the absence of liming and from 79 to 162, 79 and 119 mg dm^{-3} in the presence of liming, for the same soil types, respectively. The critical P soil levels showed to depend more on the activity of iron oxides activity in lowland soils than on the buffering capacity of the phosphate.

1 INTRODUÇÃO

A análise química do solo é a principal ferramenta da avaliação da fertilidade do solo. As recomendações de quantidades de adubo a aplicar para determinada cultura dependem, em grande parte, da qualidade da diagnose da disponibilidade de determinado nutriente no solo. No caso do P, a situação é bastante complexa, devido a grande variedade de métodos de extração do elemento que, de certa forma, é um indicativo da complexidade do comportamento do nutriente no solo.

Em se tratando de solos inundados, a dinâmica de P torna-se ainda mais complexa, pois as reações de redução, hidrólise e solubilização de outros compostos afetam o teor de P em solução (Lindsay, 1979). Sendo assim, seu comportamento em solos inundados deve ser melhor descrito pela abordagem de suas formas no solo através do método do fracionamento (Hedley, Steward e Chauhan, 1982). O conhecimento das frações de P relacionadas com o P disponível obtidas por extratores permite identificar as frações extraídas preferencialmente em determinado solo e, conseqüentemente, escolher o método mais eficaz para uma área particular (Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka, 1987). Obviamente, os teores de P recuperado por extratores devem ser correlacionados com o crescimento e o acúmulo de P pela planta.

Os métodos utilizados na avaliação do P disponível para o arroz de sequeiro têm sido testados para o arroz inundado. Dentre esses, destaca-se o Mehlich 1, mais utilizado em laboratórios de rotina do estado de Minas Gerais, e a resina trocadora de íons, considerada mais promissora na avaliação do P disponível para o arroz inundado (Motta et al., 1994; Grande, Curi e Quaggio, 1986).

Em solos inundados, Motta et al. (1994) verificaram que o método de extração de P por resina foi menos influenciado por variações nos teores de matéria orgânica e textura em comparação com métodos ácidos. Grande, Curi e Quaggio (1986) encontraram uma correlação muito estreita dos teores de P em plantas de arroz inundado com os teores de nutrientes extraídos por resina, apesar do Mehlich 1 apresentar boas correlações com o P absorvido pelas plantas em solos com menos de 10% de matéria orgânica.

Em virtude da complexidade da dinâmica de P em solos inundados e da dificuldade de avaliar sua disponibilidade nesses sistemas, o presente trabalho teve por objetivo estimar níveis críticos de P em quatro solos de várzea cultivados com arroz sob inundação pelos extratores Mehlich 1 e resina e relacioná-los com a capacidade tampão de fosfatos, quantificar formas orgânicas e inorgânicas de P nos solos e relacioná-las o P recuperado pelos extratores e pelas plantas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para esse estudo, foram utilizados os mesmos solos de várzea do capítulo 2. Após adubação básica de semeadura e 60 dias de inundação, cujos detalhes encontram-se no capítulo 2, foram tomadas amostras para determinação dos teores de P recuperado pelos extratores e fracionamento de P.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado que constituiu de um fatorial 4x5x2 com três repetições, sendo os fatores: quatro solos (GH, GP, O e A), cinco doses de P (75, 150, 300, 500, 800 mg dm⁻³), e dois níveis de calagem (ausência e presença).

Os métodos usados para extração do P disponível nos solos foram: Mehlich 1 (EMBRAPA, 1997) e resina trocadora de íons (Raj et al., 1987).

O fracionamento das formas de P no solo foi feito conforme descrito por Ivanoff, Reddy e Robinson (1998) para Histosols, sendo que o P extraído por NaOH 0,5 mol L⁻¹ não foi separado em P orgânico associado a ácidos fúlvicos e húmicos, como sugerido pelos autores. Essa metodologia baseia-se na extração sequencial das formas de P lábeis, seguidas das mais estáveis (pouco lábeis e não lábil).

Após 60 dias de inundação, antes do cultivo do arroz, duas amostras foram coletadas 3 cm abaixo do nível do solo de cada vaso (livre da zona oxidada) com um trado amostrador. O volume coletado foi pré-determinado de modo que correspondesse a 0,5 g de solo seco (TFSA) para as amostras de cada solo.

Os detalhes do plantio do arroz, das adubações e da condução do experimento estão descritos no capítulo dois.

Na primeira amostra, foram adicionados 2 mL de CHCl₃ com a finalidade de romper as células microbianas. Após duas horas, adicionaram-se 30 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ e os tubos foram agitados por 16 horas na posição horizontal. Em seguida, as amostras foram levadas em autoclave para mineralização do P da biomassa microbiana. O P lábil total (Pi - NaHCO₃ + Po-microbial) nos extratos foi determinado em autoclave com fonte de energia, utilizando-se o seguinte procedimento sugerido por Pavan e Chaves (1996): 5 mL do extrato foram transferidos para frasco erlemeyer de 50 mL, adicionando-se primeiro 0,5 g de persulfato de amônio e a seguir 10 mL de H₂SO₄ 0,9 mol L⁻¹, autoclavando-se por uma hora. O resíduo foi transferido para frasco volumétrico de 50 mL com água destilada para a determinação do P. O solo restante foi utilizado para as determinações das frações subsequentes.

Na segunda amostra, utilizou-se somente o tratamento com 30 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ e os tubos foram agitados por 16 horas na posição horizontal. Em seguida determinou-se o P lábil inorgânico (Pi-NaHCO₃) nos

extratos. Pela diferença entre o P determinado na primeira e na segunda amostra foram obtidos os teores do P microbial.

Para a determinação do P inorgânico e orgânico extraíveis com NaOH utilizou-se o seguinte procedimento: adicionaram-se nas amostras 30 mL de NaOH 0,5 mol L⁻¹, agitando-se por 16 horas e determinou-se no extrato o Pi-NaOH. Em seguida, autoclavou-se o extrato e determinando-se o P-NaOH total (Pi-NaOH + Po-NaOH). Da diferença entre os teores de Pi-NaOH e P-NaOH total resultou o Po-NaOH. O solo restante foi utilizado na extração seguinte.

Para a determinação do Pi-HCl foram adicionados 30 mL de HCl 1 mol L⁻¹ e as amostras foram agitadas por 3 horas. Após esse período as amostras foram centrifugadas a 7000 rpm por 15 minutos e o P foi dosado no sobrenadante. O solo resultante foi submetido a digestão com H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ e H₂O₂ para a detreminação do P residual.

Em todos os extratos de solo, o P foi determinado por colorimetria, segundo Murphy e Riley (1962).

Após as análises de fracionamento, as frações de fósforo utilizadas no presente estudo foram as seguintes:

- a) Fósforo lábil (PL) = Pi-NaHCO₃ + Po-microbial
- b) Fósforo pouco lábil (PPL) = Pi-HCl + Pi-NaOH + Po-NaOH
- c) Fósforo não lábil (PNL) = P-residual
- d) Fósforo total (PT) = PL + PML + PNL

Nas plantas colhidas no final do ciclo foram determinados o peso da matéria seca da parte aérea e a produção de grãos. A parte aérea das plantas foi seca em estufa de circulação forçada de ar a 65 - 70°C e pesada, obtendo-se assim o rendimento em matéria seca. A seguir, todo material vegetal foi moído em moinho tipo Willey e submetido à análise química para a determinação dos teores de P através de digestão nítrico-perclórica e determinação no extrato por colorimetria (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997). Assim, foram avaliados os

teores de P na matéria seca da parte aérea e, relacionando-se com o peso seco, determinou-se o P acumulado pelas plantas.

A eficiência dos extratores na predição do P disponível para as plantas de arroz foi estimada através de correlações simples entre a quantidade de P acumulada na parte aérea das plantas na maturação fisiológica dos grãos e o recuperado do solo pelos diferentes extratores.

Para identificar as formas de P no solo que mais contribuíram para a nutrição fosfatada do arroz, foram feitas correlações das frações de P com o P acumulado pela planta. Também foram feitas correlações entre as frações de P e os teores de P recuperado pelos extratores Mehlich 1 e resina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Frações de P no solo

Para as frações de P no solo, obtidas por fracionamento sequencial, a interação calagem x solo x dose de P foi significativa ($P < 0,01$), exceto para as frações de $Pi-NaOH$, $Pi-HCl$ e P residual, em que ocorreram diferenças significativas ($P < 0,01$) somente entre os solos estudados (Tabelas 2A, 3A, 4A).

Para todos os solos, independentemente de calagem, houve um aumento do P lábil total com o incremento das doses de P, sendo as formas de Po -microbial as que mais contribuíram para o P lábil total, exceto no solo GP, onde verificou-se uma maior contribuição do $Pi-NaHCO_3$ (Tabela 1). Pavan e Chaves (1996), em Latossolo e Ivanoff, Reddy e Robinson (1998), em Histosols, também verificaram uma maior contribuição do P inorgânico para o P lábil total.

Segundo Hedley (1982), as frações de P inorgânico lábil são as que mais contribuem para o P lábil total em solos que receberam adubação com fertilizantes minerais. Porém, segundo Brooke, Powson e Jenkinson, (1984), o P da biomassa microbiana constitui a mais importante fonte de P para as plantas.

Estudos desenvolvidos por Campbell e Racz (1975) demonstraram uma maior mineralização do P orgânico em solos sob inundação quando comparados a solos mantidos com o teor de umidade próximo à capacidade de campo. Koyama, Channux e Niamsrichand (1973) evidenciaram ainda a possibilidade de bactérias da rizosfera do arroz mineralizarem o P orgânico, tornando-o disponível às plantas, o que pode explicar a grande participação do P microbiano no P lábil total dos solos estudados.

TABELA 1. Teores das frações lábeis de P nos solos após 60 dias de inundação e antes do cultivo do arroz

Solos		Fragões P		Doses de P (mg dm ⁻²)		Com calagem	
		75	150	300	500	800	mg dm ⁻²

		Com calagem				Sem calagem			
GH	PI-NaHCO ₃	79 (38%) ¹	90 (42%)	96 (40%)	140 (47%)	248 (58%)	180 (42%)	428	
	P lúvil total	207	217	240	300				
GP	PI-NaHCO ₃	57 (47%)	124 (61%)	153 (61%)	148 (56%)	220 (66%)	116 (34%)	336	
	P lúvil total	122	202	253	264				
O	PI-NaHCO ₃	44 (18%)	61 (20%)	86 (23%)	175 (39%)	231 (40%)	345 (60%)	576	
	P lúvil total	239	304	383	455				
A	PI-NaHCO ₃	14 (33%)	42 (33%)	84 (43%)	114 (38%)	180 (39%)	286 (61%)	466	
	P lúvil total	28 (67%)	84 (67%)	110 (57%)	186 (62%)				

		Sem calagem		Número entre parênteses representa a participação percentual de cada fração no P lábil total	
GH	Pr-NaHCO ₃	65 (36%)	82 (39%)	125 (43%)	245 (57%)
	P lábil total	180	212	293	430
GP	Pr-NaHCO ₃	54 (47%)	96 (56%)	156 (57%)	225 (66%)
	P lábil total	114	171	253	340
O	Po-microbial	60 (53%)	75 (44%)	98 (39%)	115 (34%)
	P lábil total	115 (85%)	175 (84%)	279 (69%)	315 (65%)
A	Pr-NaHCO ₃	8 (27%)	20 (15%)	32 (21%)	82 (21%)
	Po-microbial	22 (73%)	60 (75%)	124 (79%)	310 (79%)
		30	80	156	392
		246			

TABELA 2. Teores das frações pouco lábeis de P nos solos após 60 dias de inundação e antes do cultivo do arroz

Solos	Frações P	Doses de P (mg dm ⁻³)			
		75	150	300	500

.....mg dm⁻³.....

Com calagem

GH	Pi-HCl	32 (8%) ¹	33 (8%)	38 (7%)	45 (10%)
	Pi-NaOH	36 (8%)	44 (9%)	50 (10%)	56 (11%)
	Po-NaOH	350 (84%)	385 (83%)	428 (83%)	350 (78%)
	P pouco lábil total	418	462	516	451
GP	Pi-HCl	9 (8%)	9 (7%)	10 (6%)	15 (7%)
	Pi-NaOH	60 (48%)	82 (53%)	89 (53%)	148 (63%)
	Po-NaOH	55 (44%)	62 (40%)	68 (41%)	70 (30%)
	P pouco lábil total	124	153	167	233
O	Pi-HCl	35 (26%)	48 (28%)	62 (27%)	75 (30%)
	Pi-NaOH	15 (11%)	27 (15%)	33 (14%)	36 (14%)
	Po-NaOH	85 (63%)	100 (57%)	135 (59%)	140 (56%)
	P pouco lábil total	135	175	230	251
A	Pi-HCl	12 (50%)	26 (45%)	52 (46%)	62 (46%)
	Pi-NaOH	3 (8%)	4 (7%)	6 (5%)	10 (8%)
	Po-NaOH	10 (42%)	28 (48%)	56 (49%)	62 (46%)
	P pouco lábil total	24	58	114	134

Sem calagem

GH	Pi-HCl	17 (4%)	17 (3%)	19 (1%)	23 (4%)
	Pi-NaOH	31 (6%)	40 (7%)	35 (6%)	65 (10%)
	Po-NaOH	455 (90%)	510 (90%)	550 (93%)	530 (86%)
	P pouco lábil total	503	567	604	618
GP	Pi-HCl	14 (10%)	37 (22%)	43 (21%)	51 (24%)
	Pi-NaOH	63 (44%)	56 (34%)	80 (39%)	71 (33%)
	Po-NaOH	65 (46%)	72 (44%)	83 (40%)	93 (43%)
	P pouco lábil total	142	165	206	215
O	Pi-HCl	11 (7%)	15 (8%)	17 (7%)	23 (9%)
	Pi-NaOH	28 (18%)	40 (20%)	52 (21%)	57 (21%)
	Po-NaOH	117 (75%)	143 (72%)	175 (72%)	189 (70%)
	P pouco lábil total	156	198	244	269
A	Pi-HCl	8 (27%)	30 (32%)	42 (33%)	46 (31%)
	Pi-NaOH	6 (20%)	12 (13%)	18 (14%)	14 (10%)
	Po-NaOH	16 (53%)	52 (55%)	66 (52%)	86 (59%)
	P pouco lábil total	30	94	126	146

Número entre parênteses representa a participação percentual de cada fração de P pouco lábil total.

Verificou-se uma maior contribuição do Po-NaOH para o P pouco lábil total dos solos, exceto no GP com calagem (Tabela 2). Nessa situação, a fração que mais contribuiu para o P pouco lábil total foi a Pi-NaOH, embora a participação da Po-NaOH tenha sido alta. O trabalho de Ivanoff, Reddy e Robinson (1998) com Histosols mostra que a maior contribuição do P orgânico para o P pouco lábil total dos solos deve-se a maior presença de Po ligado a ácidos fúlvicos. Segundo esses autores, o Po ligado a ácidos fúlvicos pode tornar-se disponível às plantas, enquanto que o Po ligado a ácidos húmicos se encontra na forma não lábil.

Para os solos GH e GP verificou-se aumento nos teores de Pi-NaOH quando se aplicou calcário. O hidróxido de sódio extrai formas de P consideradas de baixa disponibilidade para as plantas associadas a fosfatos de Fe e Al amorfos e ou cristalinos (Willians, Mayer e Nriagu, 1980). A calagem pode ter precipitado, além dos óxidos de Al os de Fe que, em condições de inundação, poderiam estar adsorvendo o P. Essa hipótese pode ser confirmada pelos maiores teores de Fe amorfo verificados nos solos GH e GP (Tabela 1, capítulo 2). Para os solos O e A com calagem, os maiores aumentos da fração Pi-HCl provavelmente promoveram decréscimos no Pi-NaOH desses solos.

A forma Pi-HCl correspondente aos fosfatos de cálcio (Walker e Syers, 1976) em solos não fertilizados de regiões temperadas é considerada disponível a longo prazo através do intemperismo (Smeck, 1985). No entanto, em solos ácidos dos trópicos esta forma não é tão estável, podendo vir a ser disponível às plantas (Araújo, Salcedo e Sampaio, 1993), sendo considerada, no presente trabalho, como parte da fração de P pouco lábil.

A alta contribuição do Pi-HCl no P pouco lábil total do solo A deve-se, provavelmente, aos teores de cálcio mais altos encontrados nesse solo em condições naturais (Tabela 1, capítulo 2). Sah e Mikkelsen (1986) registraram

um maior aumento nos teores de fosfato de cálcio quando da inundação de solos que apresentavam, inicialmente, altos teores de cálcio.

Observa-se que nos solos estudados houve um aumento da forma $Pi-HCl$ em decorrência da calagem, exceto no GP (Tabela 2). Segundo Sah e Mikkelsen (1986), o aumento na pressão parcial de CO_2 com a inundação pode solubilizar $CaCO_3$ e outros sais cálcicos. Disso decorre um aumento na atividade de íons Ca^{2+} em solução e, uma vez que a concentração de fosfato na solução também aumenta, existe a possibilidade de precipitação de fosfatos cálcicos. Singh e Singh (1976) relatam que o aumento na pressão parcial de CO_2 com a inundação pode induzir a dissolução de fosfatos de cálcio e o fósforo liberado pode então ser readsorvido por hidróxidos de ferro. Esse fenômeno pode ter ocorrido com os fosfatos de cálcio formados com a calagem no solo GP, tendo sido verificada uma maior atividade dos óxidos de ferro (Tabela 1, capítulo 2).

Assim como para as demais formas de P no solo, verificou-se um aumento do P residual com o incremento das doses de P no solo (Tabela 3). Segundo Smeck (1985), a forma P residual representa o P ocluso, retido por minerais estruturalmente livres de P, como hematita, goetita e gibbsita. Fernandes (1999), trabalhando com os mesmos solos de várzea do presente estudo, porém sob condições de sequeiro, verificou que a contribuição do P residual à fração de P não lábil dos solos foi quase que total. Ivanoff, Reddy e Robinson (1998) também verificaram uma maior porção do P residual no P não lábil total em Histosols no sul da Flórida, EUA. No presente trabalho considerou-se o P residual como a fração de P não lábil dos solos.

Tanto na presença quanto na ausência de calagem, para todos os solos estudados ocorreu um aumento nos valores de P total com o incremento das doses de P (Tabela 3). Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka (1987) também verificaram que a aplicação de P e calcário alteraram diferentemente os teores das frações de P em dois Latossolos.

TABELA 3. Teores de P total nos solos após 60 dias de inundação e antes do cultivo do arroz

Solos	Frações P	75	150	300	500	800
Doses de P (mg dm ⁻²)						

Com calagem						
GH	P lábil	207 (19%)	217 (18%)	240 (19%)	300 (23%)	428 (28%)
	P pouco lábil	418 (39%)	462 (40%)	516 (41%)	451 (34%)	505 (33%)
	P residual	443 (42%)	492 (42%)	491 (40%)	561 (43%)	587 (39%)
	P total	1068	1171	1247	1312	1520
GP	P lábil	122 (41%)	202 (48%)	253 (52%)	264 (46%)	336 (49%)
	P pouco lábil	124 (41%)	153 (37%)	167 (34%)	233 (41%)	257 (37%)
	P residual	53 (18%)	63 (15%)	67 (14%)	74 (13%)	92 (14%)
	P total	299	418	487	571	685
O	P lábil	239 (55%)	304 (54%)	383 (54%)	455 (55%)	576 (55%)
	P pouco lábil	135 (31%)	175 (31%)	230 (33%)	251 (30%)	301 (29%)
	P residual	60 (14%)	82 (15%)	92 (13%)	125 (15%)	175 (16%)
	P total	434	561	705	831	1052
A	P lábil	42 (46%)	126 (58%)	194 (51%)	300 (51%)	466 (52%)
	P pouco lábil	24 (26%)	58 (27%)	114 (30%)	134 (23%)	190 (21%)
	P residual	26 (28%)	34 (15%)	74 (19%)	150 (26%)	234 (27%)
	P total	92	218	382	584	890
Sem calagem						
GH	P lábil	180 (16%)	212 (17%)	223 (17%)	293 (20%)	430 (25%)
	P pouco lábil	503 (45%)	567 (46%)	604 (45%)	618 (43%)	697 (41%)
	P residual	432 (39%)	459 (37%)	503 (38%)	533 (37%)	585 (34%)
	P total	1115	1238	1330	1444	1712
GP	P lábil	114 (37%)	171 (43%)	253 (47%)	273 (49%)	340 (53%)
	P pouco lábil	142 (46%)	165 (42%)	206 (38%)	215 (38%)	218 (34%)
	P residual	51 (17%)	57 (15%)	75 (13%)	70 (13%)	85 (13%)
	P total	307	393	534	558	643
O	P lábil	205 (48%)	266 (49%)	353 (51%)	402 (50%)	484 (47%)
	P pouco lábil	156 (37%)	198 (37%)	244 (35%)	269 (33%)	366 (35%)
	P residual	64 (15%)	73 (14%)	95 (14%)	132 (17%)	181 (18%)
	P total	425	537	692	803	1031
A	P lábil	30 (38%)	80 (37%)	156 (40%)	246 (47%)	392 (49%)
	P pouco lábil	30 (38%)	94 (43%)	126 (32%)	146 (28%)	198 (24%)
	P residual	18 (24%)	44 (20%)	106 (28%)	134 (25%)	216 (27%)
	P total	806	218	388	526	806

Número entre parênteses representa a participação percentual de cada fração de fósforo no P total

De modo geral, as frações de P lábil e P pouco lábil foram as que mais contribuíram para o P total dos solos estudados, com exceção ao solo GH com calagem, tendo a maior contribuição sido a da fração de P residual (não lábil).

Pavan e Chaves (1996) encontraram também uma maior contribuição do P não lábil para o P total de um Latossolo Roxo.

Ainda no solo GH, verificou-se uma menor contribuição do P lábil total para o P total. Ivanoff, Reddy e Robinson (1998) também verificaram uma pequena participação do P lábil para o P total em Histosols, assim como Pavan e Chaves (1996) em Latossolos.

Independentemente das doses de P e níveis de calagem, foram verificados os maiores valores de P total e P não lábil em ordem decrescente para os solos GH, O, GP e A (Tabela 3). Sabe-se que a decomposição da matéria orgânica, tanto anaeróbica (Sah e Mikkelsen, 1986) quanto aeróbica (Farmer e Mitchell, 1963), favorece a formação de óxidos de ferro e alumínio amorfos, capazes de fixar o P, o que pode explicar os maiores teores de P não lábil nos solos GH e O e a maior contribuição do P não lábil no P total do solo GH.

Tanto na presença quanto na ausência de calagem, os valores de $Pi-NaHCO_3$, Po-microbial e P lábil total correlacionaram-se significativamente com o P acumulado pelas plantas de arroz (Tabela 4). Tanto o P microbial (Brooke, Powson e Jenkinson, 1981) quanto o $Pi-NaHCO_3$ (Bownan e Cole, 1978; Tiessen, Salcedo e Sampaio, 1992) são considerados como as principais fontes de P disponíveis às plantas.

Nos solos GP, O e A, as formas Po-NaOH, $Pi-NaOH$, $Pi-HCl$ e P pouco lábil total correlacionaram-se alta e significativamente com o P acumulado independentemente de calagem (Tabela 4). Somente no solo GH com calagem não houve correlação entre o Po-NaOH e o P acumulado pela planta, o que promoveu um coeficiente de correlação não significativo entre essa variável e o P pouco lábil total. Nos tratamentos sem calagem nesse solo, todas as formas de P pouco lábil apresentaram correlações significativas com o P acumulado pelas plantas.

Admitindo-se que a inundação promove a hidrólise dos fosfatos de ferro e alumínio por agentes quelantes oriundos da decomposição anaeróbica, a solubilização do fosfato de cálcio (Ponnamperuma, 1972) e o aumento na difusão do P (Turner e Gilliam, 1976), pode-se dizer que formas de P pouco lábeis podem tornar-se disponíveis para as plantas com a inundação, podendo contribuir para sua nutrição fosfatada. Do mesmo modo, a liberação do P oculto em óxidos de ferro hidratados em decorrência da redução do solo (Ponnamperuma, 1972) pode justificar as correlações obtidas entre o P residual e o P acumulado pelas plantas cultivadas nos solos de várzea estudados.

TABELA 4. Coeficientes de correlação linear simples entre as formas de P nos solos e o P absorvido pelas plantas

Fragões P	Solos			
	GH	GP	O	A
Com calagem				
Po-biomassa	0,96**	0,82*	0,99**	0,98**
Pi-NaHCO ₃	0,92**	0,86*	0,85*	0,97**
P lábil total	0,95**	0,87*	0,98**	0,98**
Po-NaOH	-0,21ns	0,85*	0,94**	0,89*
Pi-NaOH	0,89*	0,91*	0,90*	0,89*
Pi-HCl	0,91*	0,86*	0,92*	0,91*
P pouco lábil total	0,90ns	0,93**	0,94**	0,90*
P residual	0,95**	0,97**	0,99**	0,99**
P total	0,87*	0,92**	0,98**	0,97**
Sem calagem				
Po-biomassa	0,97**	0,93**	0,80*	0,99**
Pi-NaHCO ₃	0,93*	0,97**	0,86*	0,99**
P lábil total	0,95**	0,98**	0,89*	0,99**
Po-NaOH	0,94**	0,84*	0,84*	0,98**
Pi-NaOH	0,94**	0,97**	0,80*	0,94**
Pi-HCl	0,99**	0,80*	0,92*	0,90*
P pouco lábil total	0,96**	0,96**	0,81*	0,97**
P residual	0,99**	0,95**	0,99**	0,97**
P total	0,98**	0,98**	0,86*	0,99**

**, *, ns significativo a 1 e a 5% e não significativo, respectivamente

3.2 Disponibilidade de P pelos extratores Mehlich 1 e resina

A análise de variância demonstrou que a interação calagem x solo x dose de P alterou significativamente ($P<0,01$) o P recuperado pelos extratores Mehlich 1 e resina (Tabela 5A). Os teores de P recuperados pelos extratores estudados são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Teores disponíveis de P nos solos pelos extratores Mehlich 1 e Resina, após 60 dias de inundação

Solo	Doses de P (mg dm ⁻³)				
	75	150	300	500	800
	mg dm ⁻³				
	com calagem – Mehlich 1				
GH	41	50	71	151	196
GP	20	57	117	174	269
O	30	46	84	132	187
A	11	13	36	71	125
	sem calagem – Mehlich 1				
GH	33	50	112	138	252
GP	41	107	122	168	279
O	19	33	62	98	172
A	13	17	41	58	102
	com calagem – Resina				
GH	45	55	67	68	153
GP	81	90	152	187	338
O	31	44	42	104	152
A	27	55	82	149	262
	sem calagem – Resina				
GH	45	60	91	130	171
GP	64	112	130	162	147
O	26	39	71	110	158
A	21	25	52	97	120

De modo geral, os maiores teores de P disponível foram encontrados na ordem decrescente para os solos GP, GH, O e A. Somente nos tratamentos que receberam calcário foram constatados maiores teores de P para GP, A, GH=O quando extraídos pela resina.

Com exceção aos solos GH com e sem calagem e O com calagem, a resina extraiu mais P do que o extrator Mehlich 1. O solo GH possui teores elevados de P total e matéria orgânica, o que sugere uma contribuição do P orgânico para os resultados do extrator ácido. Segundo Grande, Curi e Quaggio (1986), o Mehlich 1 pode extrair quantidades relativamente elevadas de P em solos com elevados teores de matéria orgânica (maiores que 10%) aparentemente de formas não disponíveis para as plantas. Porém, no GH com calagem, do P orgânico, somente o Po microbial (lábil) apresentou correlação com o P recuperado pelo Mehlich 1, sendo que a forma Po-NaOH (pouco lábil) não se correlacionou com o P recuperado por nenhum dos dois extratores, assim como o P lábil total (Tabela 6).

No solo O com calagem verificou-se que o P recuperado pela resina não se correlacionou com o Po microbial, uma das formas de P mais importantes à nutrição das plantas (Brooke, Powson e Jenkinson, 1981), a forma mais presente na fração lábil desse solo (Tabela 1) e que apresentou correlação mais estreita com o P acumulado pelas plantas (Tabela 4). Assim, o princípio do método, ou seja, a transferência do P lábil do solo para a resina por troca aniônica, mostrou eficiência somente para a forma de P inorgânico lábil do solo O com calagem, dada a estreita correlação obtida do P recuperado com o $P_i\text{-NaHCO}_3$ (Tabela 6).

Agrupando-se os solos verificou-se que os dois extratores demonstraram igualdade na capacidade de extração das frações de P obtidas nos solos de várzea estudados (Tabela 6). Segundo Grande, Curi e Quaggio (1986), o extrator Mehlich 1 tem se mostrado pouco eficaz em prever o P disponível para o arroz inundado em solos de várzea, provavelmente pelo fato de haver nesses sistemas um predomínio de P ligado a ferro (Mahapatra e Patrick, 1969), sendo que os métodos ácidos recuperam preferencialmente o P ligado a cálcio (Raij, 1991). No entanto, Barbosa Filho, Kinjo e Muraoka (1987) verificou que o Mehlich 1

extrair P predominantemente dos fosfatos de ferro em Latossolos, recomendando o extrator químico para solos com predomínio dessas formas.

TABELA 6. Coeficientes de correlação linear simples entre o P recuperado pelos extratores e as formas de P nos solos de várzea

Frções P	Solos			
	Extratores	GH	GP	O

	Com calagem			
	Extratores	GH	GP	O
Po-biomassas	Resinas Mehlich 1	0,88* 0,92**	0,81* 0,90*	0,78** 0,98**
Pi-NaHCO ₃	Resinas Mehlich 1	0,93** 0,97**	0,93** 0,99**	0,98** 0,97**
P labil total	Resinas Mehlich 1	0,96** 0,97**	0,95** 0,90*	0,98** 0,97**
Po-NaOH	Resinas Mehlich 1	-0,21 ns 0,97**	0,94** 0,97**	0,90* 0,99**
Pi-NaOH	Resinas Mehlich 1	-0,14 ns 0,93**	0,87* 0,93**	0,91* 0,93**
Pi-HCl	Resinas Mehlich 1	0,83* 0,93**	0,86* 0,94**	0,85* 0,96**
P pouco labil total	Resinas Mehlich 1	0,74 ns 0,17 ns	0,88* 0,97**	0,88* 0,97**
P residual	Resinas Mehlich 1	0,54 ns 0,96**	0,91* 0,99**	0,88* 0,99**
P total	Resinas Mehlich 1	0,80* 0,91*	0,98** 0,98**	0,99** 0,97**
Po-biomassas	Mehlich 1	0,95**	0,83*	0,99**
Pi-NaHCO ₃	Resinas Mehlich 1	0,93**	0,96**	0,99**
P labil total	Resinas Mehlich 1	0,97**	0,94**	0,99**
Po-NaOH	Resinas Mehlich 1	0,96**	0,66 ns	0,99**
Pi-NaOH	Resinas Mehlich 1	0,93**	0,96**	0,99**
Pi-HCl	Resinas Mehlich 1	0,97**	0,90*	0,96**
P pouco labil total	Resinas Mehlich 1	0,96**	0,83*	0,99**
P residual	Resinas Mehlich 1	0,96**	0,83*	0,98**
P total	Resinas Mehlich 1	0,97**	0,92**	0,98**

*, **, ns significativo a 1 e a 5% e não significativo, respectivamente

ácidos.

Considerando as correlações obtidas do P recuperado pelos extratores com o P lábil dos solos (Tabela 6) e com o P acumulado pelas plantas (Tabela 7) pode-se dizer que tanto o Mehlich I quanto a resina foram eficientes na avaliação do P disponível para o arroz cultivado sob inundação nos quatro solos de várzea estudados. Esses resultados discordam em parte dos obtidos por Grande, Curi e Quaggio (1986) que apontam a resina como eficaz e o Mehlich I como pouco eficaz na predição da disponibilidade de P para o arroz inundado. Os autores demonstram que, para a resina, a influência dos teores de argila, matéria orgânica e P total é muito pequena, indicando que esse método avalia quase todo o P lábil para o arroz em solos inundados. Motta et al. (1994) também preconizam a resina como o método mais eficiente em avaliar o P disponível em solos de várzea inundados, sendo menos influenciado por variações nos teores de matéria orgânica e textura em comparação aos métodos

Extratores					
Com calagem			Sem calagem		
Solos	Resina	Mehlich I	Resina	Mehlich I	
GH	0,83*	0,99**	0,99**	0,98**	0,98**
GP	0,99**	0,97**	0,93**	0,92**	0,92**
O	0,99**	0,99**	0,88*	0,81*	0,81*
A	0,98**	0,98**	0,98**	0,98**	0,98**
Todos	0,98**	0,99**	0,99**	0,94**	0,94**

*, * significativo a 1 e a 5%, respectivamente

TABELA 7. Coeficientes de correlação linear simples entre as concentrações de P nos solos determinadas pelos extratores e P acumulado pela planta

Observou-se que para cada solo, independentemente de calagem, tanto o P extraído pela resina quanto pelo Mehlich I correlacionaram significativamente e positivamente com o P acumulado pelas plantas, tendo o mesmo ocorrido quando todos os solos foram agrupados (Tabela 7).

3.3 Níveis críticos de P no solo

Equações de regressão foram ajustadas para os teores de P recuperados pelos extratores Mehlich 1 e resina como variáveis dependentes das doses de P aplicadas em cada solo e nível de calagem (Tabela 8). Substituindo nessas equações as doses de P correspondentes a 90% da produção máxima de grãos (Tabela 4, capítulo 2), estimaram-se os níveis críticos de P nos solos pelos dois extratores (Tabela 9).

TABELA 8. Equações de regressão para o P disponível pelos extratores ($Y = \text{mg dm}^{-3}$) como variável dependente das doses de P aplicadas ($X = \text{mg dm}^{-3}$) aos solos de várzea

Solo	Extrator	Equação	R ²
Com calagem			
GH	Mehlich	$Y = 18,1382 + 0,2291^{**} X$	0,96
	Resina	$Y = 27,9765 + 0,1360^{*} X$	0,87
GP	Mehlich	$Y = 4,8315 + 0,3358^{**} X$	0,99
	Resina	$Y = 42,0047 + 0,3496^{**} X$	0,97
O	Mehlich	$Y = 15,6334 + 0,2196^{**} X$	0,99
	Resina	$Y = 11,6535 + 0,1725^{**} X$	0,94
A	Mehlich	$Y = -8,1765 + 0,1627^{**} X$	0,99
	Resina	$Y = -1,4371 + 0,3190^{**} X$	0,99
Sem calagem			
GH	Mehlich	$Y = 9,5811 + 0,2943^{**} X$	0,98
	Resina	$Y = 35,209 + 0,1756^{**} X$	0,99
GP	Mehlich	$Y = 35,3728 + 0,2960^{**} X$	0,96
	Resina	$Y = 78,0121 + 0,1397^{*} X$	0,84
O	Mehlich	$Y = 0,5822 + 0,2088^{**} X$	0,99
	Resina	$Y = 13,520 + 0,1843^{*} X$	0,99
A	Mehlich	$Y = 1,2580 + 0,0123^{**} X$	0,99
	Resina	$Y = 9,1571 + 0,1475^{**} X$	0,96

** significativo a 1% pelo teste t

TABELA 9. Níveis críticos de P estimados nos solos de várzea para o arroz inundado, correspondentes a 90% da produção máxima pelos extratores Resina e Mehlich 1

Solo	Extratores			
	Com calagem		Sem calagem	
	Resina	Mehlich 1	Resina	Mehlich 1
	mg dm ⁻³			
GH	78,77	103,75	98,76	115,95
GP	161,71	119,81	124,93	134,76
O	78,95	101,30	65,23	59,17
A	119,21	53,35	67,82	50,22

Os maiores valores de níveis críticos de P no solo obtidos pela resina foram verificados em ordem decrescente para GP, GH, A e O na ausência de calagem e para GP, A, GH=O na presença de calagem. Para o extrator Mehlich 1, independentemente de calagem, os mais altos valores de níveis críticos de P no solo foram observados em ordem decrescente para GP, GH, O e A. Mello (1991) também encontrou amplas variações nos valores de nível crítico de P em nove solos inundados diferindo em função dos extratores utilizados, assim como no presente trabalho.

Independentemente do extrator utilizado e do nível de calagem, maiores níveis críticos de P no solo foram estabelecidos para o GP. Esses valores são decorrentes de uma baixa capacidade tampão de fosfatos verificada pelos altos valores de P remanescente e baixa capacidade de adsorção de P (Tabela 1, capítulo 2). Além disso, verifica-se para esse solo uma maior capacidade de adsorção do P em solução pelos óxidos de ferro em meio reduzido, dada pela alta relação Fe_0/Fe_4 (Tabela 1, capítulo 2). Assim, maiores teores de P devem ser mantidos na solução do solo disponíveis às plantas, já que nesse solo ocorre um esgotamento mais rápido do P em solução.

Alguns resultados de pesquisa têm demonstrado que a disponibilidade de P para plantas de arroz está relacionada com o fator capacidade tampão de P

dos solos (Hossner, Freeouf e Felsom, 1973; Sanchez e Smith, 1980; Moraes e Dynia, 1992). Na Tabela 10 encontram-se os coeficientes de correlação calculados entre os níveis críticos de P e o P remanescente dos solos (Tabela 1, capítulo 2), característica que reflete a capacidade tampão de fosfatos (Muniz et al., 1985).

TABELA 10. Coeficientes de correlação linear simples entre os níveis críticos de P e o P remanescente dos solos de várzea estudados

Extrator	Com calagem	Sem calagem
Mehlich 1	0,18 ns	0,47ns
Resina	0,99**	0,67ns

******, ns significativo a 1 % e não significativo, respectivamente

Somente os níveis críticos obtidos pelo extrator resina na presença de calagem apresentaram correlação alta e significativa com o P remanescente. Mélo (1991) também verificou que os níveis críticos de P obtidos no solo pelo Mehlich 1 não se correlacionaram bem com características dos solos que exprimem a capacidade tampão de fosfatos, ao passo que para o extrator “papel aniônico”, que possui o mesmo princípio da resina, essas correlações foram mais altas. O autor explica que durante a análise de P o extrator de Mehlich 1 destrói parte das matrizes de adsorção, que são os óxidos de baixa estabilidade. Esses óxidos, entretanto, permanecem intactos durante as análises de adsorção de P (P remanescente ou outra medida da capacidade tampão). Nesse sentido, as quantidades de P recuperadas por Mehlich 1 podem ser diferentes para solos de igual capacidade tampão mas que diferem entre si pela estabilidade de seus óxidos. Um exemplo disso está no fato de solos A e GP apresentaram valores muito distantes de níveis críticos estabelecidos pelo Mehlich 1 (Tabela 9), sendo similares na capacidade tampão de fosfatos e distintos na estabilidade de seus óxidos (Tabela 1, capítulo 2).

Quando correlacionaram-se os níveis críticos de P no solo com a atividade dos óxidos (Fe_o/Fe_d) (Tabela 1, capítulo 2) verificaram-se correlações significativas e positivas, exceto para os níveis críticos estabelecidos pela resina nos tratamentos com calagem (Tabela 11). Sabe-se que a calagem estabiliza os óxidos de ferro em meio reduzido (Mello, 1991) e aumenta a capacidade do solo em fornecer P para as plantas (Silva e Raij, 1999). Provavelmente a resina identificou melhor esses efeitos, ressaltando-se a estreita correlação dos níveis críticos de P nos solos tratados com calcário, estimados pela resina com a capacidade tampão de fosfatos (Tabela 10).

TABELA 11. Coeficientes de correlação entre os níveis críticos de P e a atividade dos óxidos de ferro (Fe_o/Fe_d) dos solos de várzea estudados

Extrator	Com calagem	Sem calagem
Mehlich 1	0,83*	0,99**
Resina	0,44ns	0,97**

**, ns significativo a 1 % e não significativo, respectivamente

Segundo Silva e Raij (1999), a resina é o único método que revela adequadamente o efeito da calagem em aumentar a disponibilidade de P para as plantas, apresentando o melhor embasamento teórico para a determinação do "fator quantidade" de P nos solos.

De acordo com os resultados obtidos e apresentados nas Tabelas 10 e 11, pode-se dizer então que, de maneira geral, os níveis críticos de P nos solos de várzea estudados foram mais dependentes da atividade dos óxidos de ferro do que do fator capacidade tampão de fosfatos dos solos.

4 CONCLUSÕES

As formas de P pouco lábeis também contribuíram para a nutrição fosfatada do arroz inundado.

Os dois extratores testados demonstraram igualdade na recuperação das formas de P dos solos e eficiência na avaliação do P disponível para o arroz cultivado sob inundação nos solos de várzea estudados.

Os valores de níveis críticos estimados pelo Mehlich 1 foram de 104; 120; 101 e 53 na presença de calagem e de 116; 135; 59 e 50 mg dm^{-3} de P na ausência de calagem para os solos GH, GP, O e A, respectivamente. Quando estimados pela resina foram de 79; 162; 79 e 119 mg dm^{-3} com calagem e de 99; 125; 65 e 68 mg dm^{-3} de P para os mesmos solos sem calagem, respectivamente.

Os níveis críticos de P no solo mostraram-se mais dependentes da atividade dos óxidos de ferro dos solos de várzea do que do fator capacidade tampão de fosfatos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, L.H.; SAMPAIO, V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I. intensidade e formas de acumulação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n. 3, p.389-396, set./dez. 1993.
- BARBOSA FILHO, M.; 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, v.11, n.2, p.147-155, mai./ago.1987.
- BLANCO, H.G.; WUTKE, C.P.; AMARAL, A.J.; IGUE, K.; VERDADE, F.C. Fertilidade de alguns solos de várzea do Vale do Paraíba. *Bragantia*, Campinas, v.23, n.6, p.55-63, fev. 1964.

- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. Transformations of organic phosphorus substrates in soil are evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Science*, Baltimore, v.125, n. 1, p.49-54, jan. 1978.
- BROOKE, P.C.; POWSON, D.S.; JENKINDON, D.S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, Great Britain, v.16, p.169-175, 1984.
- CAMPBELL, L.B.; RACZ, G.J. Organic and inorganic P content, movement and mineralization of P in soil beneath a feedlot. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.55, n. 4, p.457-466, Nov. 1975.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212p.
- FARMER, V.C.; MITCHELL, B.D. Occurrence of oxalates in soil clays following hydrogen peroxide treatment. *Soil Science*, Baltimore, v.96, p.221-229, 1963.
- FERNANDES, L.A. Formas de alumínio, de fósforo e fosfatase ácida em solos de várzea cultivados com feijoeiro: Influência da calagem e fósforo. Lavras: UFLA, 1999.p. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- GRANDE, M.A.; CURI, N.; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.10, n. 1, p.45-50, jan./abr.1986.
- HEDLEY, M.J.; STEWARD, W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, n.5, p.970-976, Sept./Oct.1982.
- HOSSNER, L.R.; FREEOUF, J.A.; FELSOM, B. L. Solution phosphorous concentration and growth of rice (*Oryza sativa* L.) in flooded soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. Madison, v.37, n.3, p.405-408, May/June, 1973.

IVANOFF, D.B.; REDDY, R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Science, Florida*, v.163; n.1, p.36-45, Jan. 1998.

KOYAMA, T.; CHAMMEK, C.; NIAMSRICHAND, N. Nitrogen application technology for tropical rice as determined by field experiments using ^{15}N tracer technique. Ministry of Forestry and Agriculture, Tokyo: Ministry of Forestry and Agriculture, 1973. (Tropical Agriculture Research Center Technical Bulletin, 3)

LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York: John Wiley, 1979. 449p.

MAHAPATRA, I.C.; PATRICK, W.H. Inorganic phosphate transformation in waterlogged soils. *Soil Science, Madison*, v.107, n.4, p.281-288, Apr. 1969.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 210p.

MELLO, J.W.V. Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados. Viçosa: UFV, 1991. 212p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

MORAES, J.F.V.; DYNIA, J.F. Alterações nas características químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico sob inundação e após a drenagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.2, p.223-235, fev. 1992.

MOTTA, A.C.V. Avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea do Estado de Minas Gerais. Lavras: ESAL, 1988, 95p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de plantas).

MOTTA A.C.V.; CARVALHO, J.G.; GUEDES, G.A.A.; CURI, N. Comparação entre métodos para avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. *Ciência e Prática*, Lavras, v.18, n.4, p. 349-356, out/dez. 1994.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, London, 27, p.31-36, 1962.

- PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, n.2, p.251-256, mai./ago. 1996.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, v.24, p.28-96; 1972.
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343p.
- RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170p.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.50, n.1, p.62-67, Jan./Feb.1986.
- SANCHES, P.A.; SMITH, T.J. Níveis críticos de fósforo para arroz de sequeiro em um latossolo dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência dos Solos*, Campinas, v.4, n.1, p.88-92, jan./abr.1980.
- SILVA, F.C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.2, p.267-288, fev. 1999.
- SINGH, S.; SINGH, S.B. Effect of waterlogging and organic matter on inorganic P fractions of soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, New Delhi, v.24, p.88-90; 1976.
- SMECK, N.E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, Amsterdam, v.36, n.3, p.185-199, Mar. 1985.
- TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrients and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Ecosystems and Environments*, Amsterdam, v.38, p.139-159, 1992.
- TURNER, F.T.; GILLIAN, J.W. Increased P diffusion as an explanation of increased P availability in flooded rice soils. *Plant and Soil*, The Hague, v.45, n.2, p. 365-377, Feb. 1976.

ANEXO A

	Página
TABELA 1A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) da produção de grãos/vaso, número de perfilhos/planta e teor de P na folha bandeira do arroz em função dos solos, calagem e doses de P estudados.....	72
TABELA 2A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das frações de fósforo lábil em função dos solos, calagem e doses de P estudados.....	72
TABELA 3A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das frações de fósforo pouco lábil em função dos solos, calagem e doses de P estudados.....	73
TABELA 4A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das frações de fósforo residual e total em função dos solos, calagem e doses de P estudados.	73
TABELA 5A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) do P recuperado por Mehlich 1 e Resina em função dos solos, calagem e doses de P estudados.....	74

TABELA 1A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) da produção de grãos/vaso (PGV), número de perfilhos/planta (PERF) e teor de P na folha bandeira (TPFB) em função dos solos, calagem e doses de P estudados

Causas de variação	GL	Quadrado médio		
		PGV	PERF	TPFB
Calagem	1	3200,13**	129,17**	0,094**
Solo	3	1786,69**	107,35**	0,527**
Doses de P	4	6570,13**	2230,58**	0,736**
Calagem*Solo	3	1197,04**	58,67**	0,927**
Calagem*Doses de P	4	468,25**	18,30ns	0,415**
Solo*Doses de P	12	232,04**	50,02**	0,160**
Solo*Calagem*Doses de P	12	126,02**	30,26**	0,856**
Resíduo	80	8,71	8,13	0,005**
TOTAL	119			
CV (%)		5,13	7,41	3,62

**, ns significativo a 1% e não significativo, respectivamente

TABELA 2A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das frações de fósforo lábil em função dos solos, calagem e doses de P estudados

Causas de variação	GL	Quadrado médio		
		Po-microbial	Pi-NaHCO ₃	P lábil total
Calagem	1	355,352**	5805,502**	45046,87**
Solo	3	22772,963**	1204522,569**	195068,82**
Doses de P	4	34792,269**	54441,779**	542516,66**
Calagem*Solo	3	2849,435**	30465,691**	11556,47**
Calagem*Doses de P	4	444,956*	1033,898**	1025,97**
Solo*Dose de P	12	2849,435**	3298,815**	70311,03**
Solo*Calagem*Doses de P	12	164,268**	206,462**	1202,11**
Resíduo	80	43,064	183,948	98,64
TOTAL	119			
CV (%)		4,56%	5,88%	3,1%

*, * significativo a 1 e a 5%, respectivamente

TABELA 4A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das traças fósforo pouco-lábil em função dos solos, calagem e doses de

Causas de variação				
GL	P-HCl	Pi-NaOH	Po-NaOH	P-pouco
Quadrado médio				
Calagem	16251,769**	4921,602**	91521,693**	1606,01**
Solo	4207,102**	18576,369**	1086657,89**	9238,92**
Doses de P	157,268ns	667,549ns	15418,986**	25658,94**
Calagem*Solo	1967,935**	12342,346**	33436,767**	1985,61**
Calagem*Doses de P	33,399ns	124,222ns	2411,461**	406,11**
Solo*Doses de P	15,854ns	54,527ns	2851,134**	1491,102**
Solo*Calagem*Doses de P	14,685ns	25,327ns	1099,969**	589,92**
Resíduo	119	80	138,248	138,248
TOTAL	119	80	138,248	138,248
CV (%)	41,01%	38,99%	6,67%	6,09%

** , ns significativo a 1% e não significativo, respectivamente

TABELA 4A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) das traças fósforo residual e fósforo total em função dos solos, calagem e

Causas de variação				
GL	P-HCl	Pi-NaOH	Po-NaOH	P-pouco
Quadrado médio				
Calagem	285,21ns	72471,67**	1047409,2**	1185665,6**
Solo	1419588,6**	37938,9**	4541,55**	88938,97**
Doses de P	373,19**	136,87ns	1067,16**	247,93
Calagem*Solo	317,81**	2337,01**	88938,97**	12,01
Calagem*Doses de P	2218,32**	373,19**	1067,16**	247,93
Solo*Doses de P	2218,32**	373,19**	1067,16**	247,93
Solo*Calagem*Doses de P	2218,32**	373,19**	1067,16**	247,93
Resíduo	119	80	138,248	138,248
TOTAL	119	80	138,248	138,248
CV (%)	5,0%	2,63%	2,63%	2,63%

** , ns significativo a 1 e a 5% e não significativo, respectivamente

TABELA 5A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) do P recuperado por Mehlich 1 e Resina em função dos solos, calagem e doses de P estudados

Quadrado médio		Causas de variação		GL	Mehlich 1		Resina
Calagem	1	99,01**	9523,01**				
Solo	3	40511,70**	29127,90**				
Doses de P	4	111350,10**	80813,55**				
Calagem*Solo	3	2354,21**	10389,47**				
Calagem*Doses de P	4	709,57**	6687,72**				
Solo*Doses de P	12	2939,98**	950,49**				
Solo*Calagem*Doses de P	12	618,16**	2977,85**				
Resíduo	80	1,700	1,00				
TOTAL	119						
CV (%)		1,37%	1,00%				

** , significativo a 1%